

좁은 다중 동축 석영관 내부에서의 예혼합 화염의 전파 특성에 대한 기초 실험

조문수* · 백다빈* · 김남일***

Basic Experiment on the Propagation Characteristics of Premixed Flames in Narrow Annular Coaxial Quartz Tubes

Moon Soo Cho, Da Bin Baek and Nam Il Kim

ABSTRACT

Flame stabilization characteristics of premixed flames in narrow annular coaxial tubes (NACT) were investigated experimentally. The NACT burner was proposed as a model of a cylindrical refractory burner, and it was made of quartz tubes. Flame stabilization conditions affected by the characteristic length of the burner was investigated with the variation of the equivalence ratio and the flow rates. Flame behaviors in narrow spaces could be directly observed. Conclusively, more wide flame stabilization conditions could be obtained at the case of the decreased channel scale. A flame instability, such as combustion noise was detected concerned with the flame oscillation observed at the surface of multi channel stage. Some flame propagation characteristics had complicated tendencies that may exist in practical porous-media combustors. Therefore, this NACT burner can be a basic configuration for the development of flame stabilization model in porous media combustor, and it will enhance our understanding about the behavior of flames in meso-scale combustion spaces.

Key Words : Annular coaxial tubes(환형 동축관), 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)

w : 채널 간격(channel distance)
 V_1 : 단일관 평균속도(mean velocity)
 ϕ : 당량비(equivalence ratio)

1. 서론

산업에 사용되는 연소기 중에는 허니컴 및 다공성 구조를 가지는 단일 재료를 연소기의 소재로 활용하는 경우가 다수 있다. 주로 세라믹 소재를 활용한 경우가 많으며[1], 다양한 구조 형상을 비교적 쉽게 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 가정용 보일러 연소기와 같이 균일한 형상의 예혼합 표면 화염을 형성하기 위한 목적으로는 비교적 낮은 기공율을 가지는 연소기 형상을 선택하게 되며[2], 이

경우 단일소재의 낮은 열전도 특성은 화염의 역화를 억제하는데 도움이 된다. 이에 반해 단일재료는 연소기 내부에 화염을 안정화시키기 위한 목적으로도 활용되고 있는데, 이를 위해서는 상대적으로 큰 기공율을 가지는 구조를 선택하게 된다. 일단 다공성 연소기 내부에 화염이 형성된 조건에서는 단일 소재의 낮은 열전도 특성과 높은 복사 열전달 효과는 화염의 안정화에 유리한 특성을 가지게 됨이 알려져 있다. 이러한 특성을 적극 활용할 때 연료의 가연범위를 확대하거나 공해물질의 발생을 제어할 수 있으며, 낮은 발열량을 가지는 연료의 연소 기술로도 활용될 수 있다.

이처럼 단일소재를 활용한 다양한 연소기들의 개

* 중앙대학교 일반대학원

** 중앙대학교 기계공학부

† 연락처자, nikim@cau.ac.kr

발과 운전에 있어서 화염의 안정화 및 거동 특성은 매우 중요하므로 예전부터 많은 연구자들이 관심을 가지고 연구를 수행하였다. 특히 다공성 연소기 내부 화염은 일반적인 가스연소의 현상과 달리 연소기의 구조 특성과 소재 특성에 의해 매우 다양한 현상의 발생을 기대할 수 있어서 다양한 연구가 진행되어 왔다. 국내에서는 세라믹 다공성 연소기 표면 화염의 당량비에 변화에 의한 화염 형상에 따른 NOx와 같은 공해 물질 배출 특성에 대한 연구[1]와 여러 가지 소재 및 기공율을 변화시킨 원통형 다공성 연소기로부터 당량비에 따른 배기가스 배출 특성에 대한 연구[2] 등이 보고된 바 있다.

그런데 기존의 많은 실험 연구들이 연소기 내부 화염 거동을 직접 관찰하지 않고 연소기의 외부 표면이나 입출구 경계에서의 측정 결과 등 간접적인 관찰을 토대로 하고 있다. 대표적인 예로 Min 등[3]에 의해 수행된 연구를 들 수 있는데, 화염이 세라믹 연소기 내부에 남긴 연소흔적을 토대로 다공성 물질의 외부 열적 경계 조건에 따라 2가지 화염 안정화 모드가 존재함을 실험적으로 제시하였다. 그러나 이러한 간접적 결과들은 연소기 내부에서 실제 벌어지고 있는 현상을 이해하는데 매우 제한적이다. 연소기 내부 현상을 이해하기 위해서 별도의 수치 해석[4,5] 또한 다수 이루어졌지만, 직접 비교할 수 있는 실험적 결과가 제한적이어서 실제 현상에 대한 이해에 진전이 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 다양한 특성 길이 스케일을 가지는 다공성 연소기 또는 허니컴 연소기의 내부 화염의 안정화 특성을 연구하기 위한 기초 연구로서, 화염의 직접 관찰이 가능하면서 전도 특성이 낮은 다수의 석영관을 활용하여 다공성 연소기의 특성을 구현하고자 한다. 지금까지 동축관 내부에서의 확산화염의 거동에 대한 연구들은 버크-슈만(Burke-Schumann) 이후 비교적 많은 연구가 이루어졌다. 하지만, 예혼합 화염 거동에 대한 연구 보고는 상대적으로 부족하였으며, 소염 거리와 비교할 수 있는 비교적 좁은 특성 거리 스케일에서의 동축관 내부 화염에 관한 연구는 제한적이었다. 본 연구 그룹에서도 좁은 다중 채널 내부에서의 화염 직접 관찰을 통한 거동 특성을 연구한 바 있지만[6], 해석적 차이를 가지는 다중 동축관 구조에 대한 연구는 부족하였다. 좁은 연소공간 특성 스케일을 가지는 연소기의 경우, 예혼합 화염의 열 및 유동 상호작용에 대한 민감성으로 인해 화염의 안정화 특성 역시 연소기의 형상에 의해 민감하게 변화할 것으로 기대된다. 본 연구를 통해 여러 개의 동축관에 의한 좁은 연소공간을 가지는 연소기 형상에 대해 루이스수와 화염의 특성 길이 스케일이 다른 메탄과 프로판 연료의 화염 안정화 특성과 각각의 조건에서의 화염의 거동 특성을

직접 관찰하고 비교하고자 한다. 이를 통해 본 연구에서 활용한 연소기의 형상이 다공성 연소기의 거동 특성을 이해하기 위한 기초 모델로 활용될 수 있는지를 평가하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 연소기의 기본 형상을 Fig. 1에 제시하였다. 관내에서 화염의 전파 거동을 직접 관찰하기 위해 석영관을 사용하였으며, 연소공간의 크기 변화에 따른 기본적인 효과를 비교하기 위해서 1개 또는 2개의 내부 동축관을 설치하였고, 각각의 연소기를 연소기-I, 연소기-II로 표시하였다. 내부 동축관의 길이는 연소기 바닥으로부터 35 cm이며, 그 끝단(step)은 외부 석영관의 출구(exit)로부터 25 cm 상류에 존재한다. 관내에서 채널 수 및 간격 증가에 따른 다중관 표면 근처에서의 화염의 전파 특성도 함께 비교하기 위해 단일 관만 존재하는 일정 길이의 구간을 두었으며, 본 연구에서 주로 다루고자 하는 다중 채널 내부에서의 현상 관찰을 위해 다중관 구간은 단일 관 구간보다 다소 길게 적용하였다.

따라서 화염이 존재하는 구간은 연소기-I과 연소기-II 조건에서 다중채널 내부와 단일 채널 내부로 각각 구분할 수 있다. 연소기-I의 다중채널 부분에서는 2개의 환형 유로를 가지므로 이 영역을 I-2, 하류의

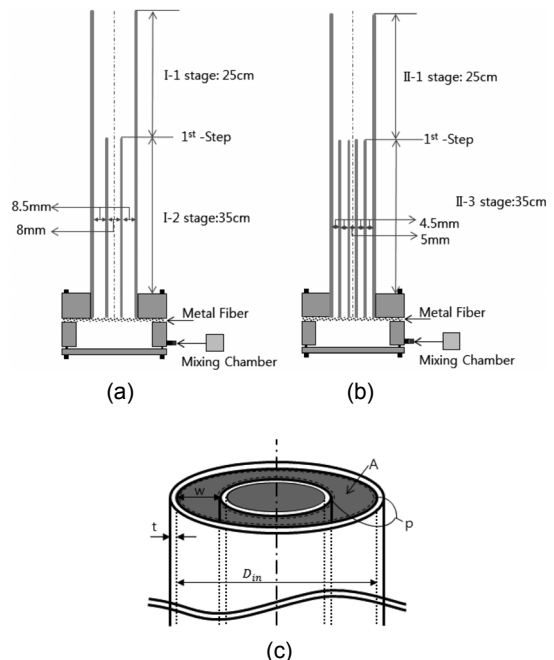


Fig. 1. Schematics of the narrow annular coaxial tubes (NACT); (a) Burner-I, (b) Burner-II (c) parameter define.

Table 1. Quartz Tube specs

		tb1	c12	tb2	c23	tb3	c3
1 tube	Din [mm]	27					
	t [mm]	1.5					
	A [mm ²]		573				
	p [mm]		84.8				
	A/p [mm]		6.8				
2 tube (burner-I)	Din [cm]	27		8			
	t [mm]	1.5		1			
	w [mm]		8.5		8.0		
	A [mm ²]		494		50		
	p [mm]		116		25		
3 tube (burner-II)	Din [mm]	27		16		5	
	t [mm]	1.5		1		1	
	w [mm]		4.5		4.5		5.0
	A [mm ²]		318		163		20
	p [mm]		141		72		16
	A/p [mm]		2.3		2.3		1.3

단일 채널 영역을 I-1 이라고 표시하며, 연소기-II의 경우 3개의 환형 유로를 가지므로 이 영역을 II-3, 하류의 단일 채널 영역을 II-1으로 표시하기로 한다.

사용된 관의 치수는 Table 1에 나타내었다. 관의 개수를 증가시키에 따라 관 내부 간격은 좁아져서 최소 소염 거리에 점차 가까워지게 된다. 석영관의 적절한 조합을 통해 내부 관의 직경과 채널 간격을 0.5 mm 차이 이내로 맞추었다. 사용된 연료는 메탄(99.995%)과 프로판(99.95%)이며, 수분제거 필터를 거친 공기와 혼합된다. 유량 및 당량비의 제어는 질량유량계(mass flow meter)를 사용하였다. 연소기 유입되는 초기 속도의 균일화와 화염의 역화를 방지하기 위해 연소기 하부에는 메탈화이버(metal fiber)를 설치하였다.

다중 관내에서의 예혼합 화염의 연료, 당량비, 유속에 따른 화염의 안정화 특성은 외관의 출구에 화염을 형성하고 유속과 당량비를 조절하여 화염이 관 내부로 전파하기 시작하는 조건, 화염이 내부 관의 상단에 부착하는 조건, 그리고 다중관에 해당하는 영역에 존재하는 조건을 실험하였다. 유속(V_m)은 단일관에 해당하는 외관의 유로 단면적을 기준으로 계산하였으며, 당량비는 $\phi = 0.6 \sim 0.8$ 범위의 연료희박 조건에서 실험이 수행되었다. 동일 당량비 조건에서 유속을 1분 간격을 두고 감소시키므로써 연소기에 적절한 수준의 동일한 전도 시간을 부여하여, 화염 안정화 현상에 내재된 특성이 반영될 수 있도록 하였다. 각 연료의 당량비 별 유속 조건에 따른 전파 특성에 대해 관내에서의 화염의 위치로부터 관의 개수 증가에 따른 채널 간격 변화로부터 화염의 거동 변화를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 화염 안정화 특성

두 버너의 화염 안정화 특성을 메탄과 프로판에 대해 Fig. 2에 표시하였다. 단일관의 끝단에 형성된 화염의 날림(blowout)이 발생하는 조건과 상대적으로 낮은 유속에서 내부관의 끝단(step)에 화염이 안정화 되는 조건, 그리고 다중관에 해당하는 내부관 내부로 전파한 화염이 빠른 속도로 역화(flashback)하거나 소염(quenching)이 발생하는 조건을 나타내었다. 단일 관 출구에서 두 종류의 연소기에서 거의 동일한 날림 특성을 가지는 것을 확인할 수 있어서

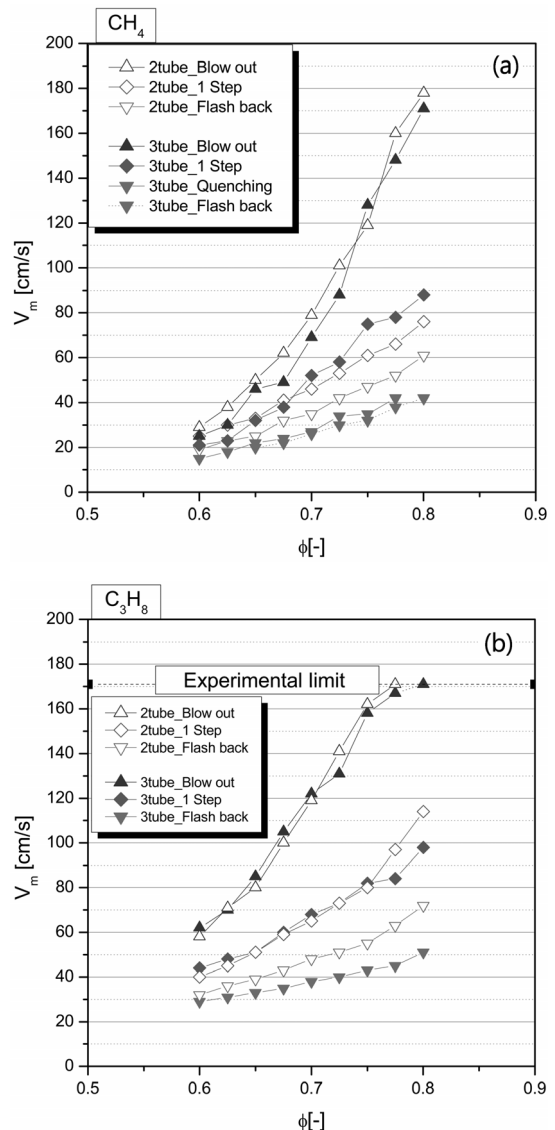


Fig. 2. Flammability Diagrams (a)for methane, (b)for propane.

결과의 상대 비교 가능성을 보여준다. 전체적으로 메탄에 비해 프로판은 상대적으로 높은 유속 조건에서 화염이 안정적으로 존재할 수 있었는데, 이는 프로판의 상대적으로 큰 연소 속도에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 단, 연소기-I과 연소기-II의 채널의 단면적 감소가 10%에 미치지 못함에도 불구하고 역화 조건은 대략 30% 정도 확대되는 것을 확인할 수 있다. 이는 평균 속도 뿐만 아니라 채널의 간격 감소가 화염의 구조에 영향을 미친 결과로 판단되는데, 그 원인에 대해서는 화염의 거동과 함께 보다 자세히 고찰하고자 한다.

유량 변화에 따라 관의 경계를 거치는 화염의 위치 변화를 메탄과 프로판에 대해 각각 Fig. 3과 Fig. 4

에 비교하였다. 전반적으로 출구 단일 관 내로 유입되는 조건에서는 일단 화염이 단일 관 내부로 유입되면 유량에 상류로 지속적으로 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 2중관 표면에서 메탄의 안정화는 3중관에 비해 실험적으로 구현하는 것이 어려웠다. 하지만 프로판의 경우에는 다중관 표면에 화염을 안정화 시키는데 큰 차이를 발견할 수 없었다. 이는 유한한 크기의 채널에 대해 루이스 수가 다른 연료가 각기 다르게 영향을 받기 때문으로 판단된다.

또한, 실험을 통해 2중관과 3중관 표면에 형성된 화염이 다중관 내부로 전파하기 시작하는 조건에서 화염이 진동하는 경향을 발견하였다. 이러한 효과는 당량비가 증가함에 따라 화염 두께가 얇아지면서

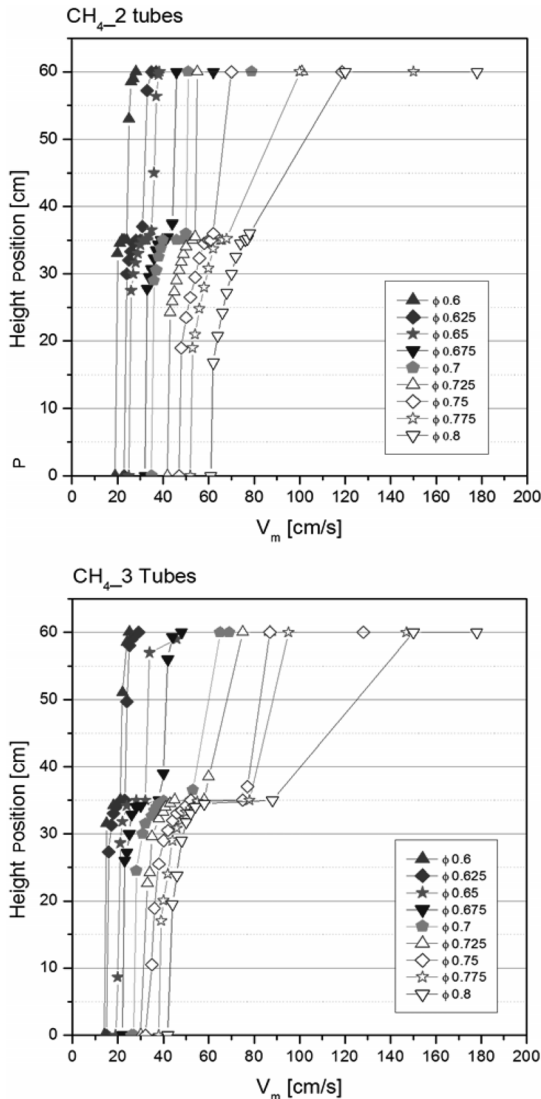


Fig. 3. Flame height positions each tube numbers for methane.

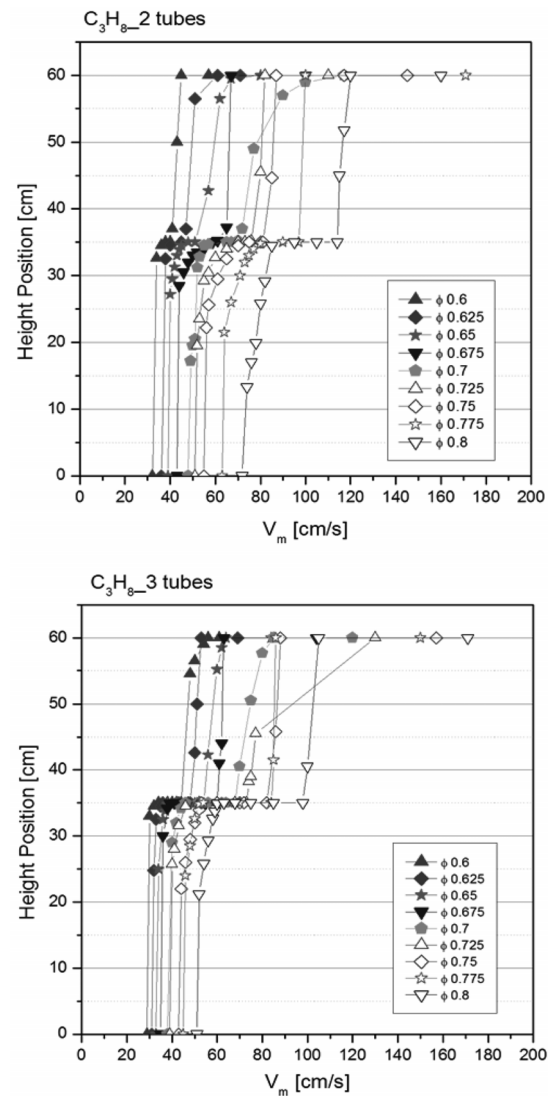


Fig. 4. Flame height positions each tube numbers for propane.

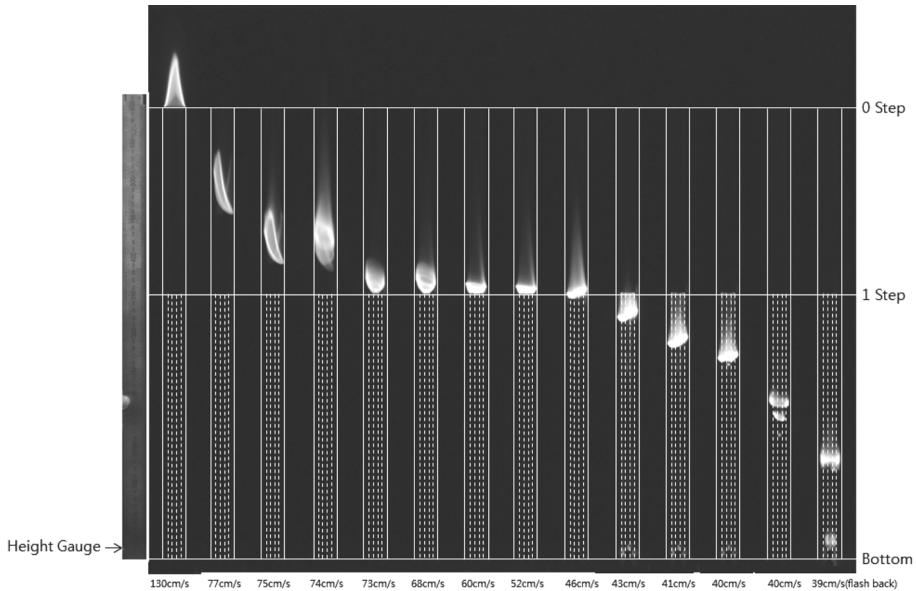


Fig. 5. Flame shape differences in tubes($\phi=0.725$, propane at 3tubes).

더욱 두드러지게 나타나는데 실험 영역 내 최고 당량비 0.8의 경우에서 메탄과 프로판 모두 진동과 같은 화염 불안정성이 가장 두드러지게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 다중관 표면에서 발생하는 화염 불안정성은 루이스 수가 다른 연료에 상대적인 크기의 차이는 있겠지만, 차등확산에 의해 기인한 것이라기보다는 다중관 표면에서 발생하는 예혼합 가스의 유동 불균일성과 국부적인 재순환이 화염의 형상과 국부적 소염 등에 영향을 미친 결과로 판단되었다. 이러한 다중채널 및 다공성 연소기 표면에서의 연소 불안정 및 연소소음 현상은 일반적으로 관찰되어온 현상이지만 명확한 규명은 부족하였다.

본 연구에서는 다중관 표면 및 내부에서의 화염의 직접적인 형상 변화를 관찰할 수 있다는 장점을 가지고 있어서 관찰 결과를 바탕으로 화염의 안정화 및 거동 특성을 직접 규명할 수 있을 것으로 기대되었다. 화염이 관 내부로 전파하는 조건에서는 다양한 구조적 변화를 보이게 되는데, 대표적인 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 프로판 3중관 연소기에 대해 당량비 0.725 조건에서 유량을 감소시킬 때 화염의 위치와 형상 변화를 보여준다. 화염의 전파 과정에서 발생하는 휘염의 형성 등 다양한 현상들이 보다 자세히 다루어질 필요가 있지만 본 연구에서는 다중관 표면 및 내부로의 전파 현상에 주안점을 두게 된다.

화염이 다중관 표면에 형성된 이후 유량의 감소에 따라 표면 화염의 형상 및 진동 특성에 변화를 거쳐 일정 유량 이하에서 다중관 내부로 전파하게 된다. 이 과정에서도 프로판의 경우 특정 조건에서 휘

염의 발생을 관찰할 수 있었다. 이러한 휘염의 발생은 실험과정을 통해 재현성 있게 관찰되었다. 비록 예혼합 화염이지만 연소 조건에 따라 연소기 표면에서 발생하는 국부적 소염이나 유동의 특성과 연계된 것으로 판단되는데, 이에 대해서는 향후에 보다 자세히 고찰하기로 하고 본 논문에서는 다중채널 연소기 표면과 내부 전파과정에서 관찰되는 특징적인 예혼합화염면의 구조에 대해 고찰하고자 한다.

3.2. 다중관 표면 화염과 연소소음

우선, 다중관 표면에서 발생하는 연소소음의 원인을 고찰하기 위해 3중 채널의 표면에 형성된 화염에 대해 소음이 발생하는 조건과 발생하지 않는 조건에 해당하는 메탄과 프로판의 화염을 Fig. 6에 비교하였다. 기존의 연구[7]를 통해 연소기 표면에 화염면의 일부가 근접하여 형성된 조건에서 연소소음 발생이 관의 끝단에 형성된 국부적 유동 재순환에 의해 영향 받을 수 있음이 알려져 있다. 이러한 경우에 다중채널 끝단에서 발생하는 유동 재순환이 화염의 소염에 지배적인 영향을 미치는 경우에는 유속과 관의 두께에 의해 결정되는 재순환 유동의 주기와 연료와 당량비에 의해 결정될 것으로 예상할 수 있다. 실제 실험으로부터 화염 면이 Fig. 6(a)와 같이 연소기 표면에 완전히 붙지 않았을 때 화염 길이가 유속이 다소 낮은 조건에 해당하는 Fig. 6(b)에 비해 상대적으로 길게 나타나며 화염이 붙지 않은 채널 사이로부터 비교적 빠른 유속으로부터의 유동 재순환 주기에 의해 화염이 영향을 받고 있으므로 이해할 수 있다. 이때, 당량비가 이론 당량비 조건에 가까워짐

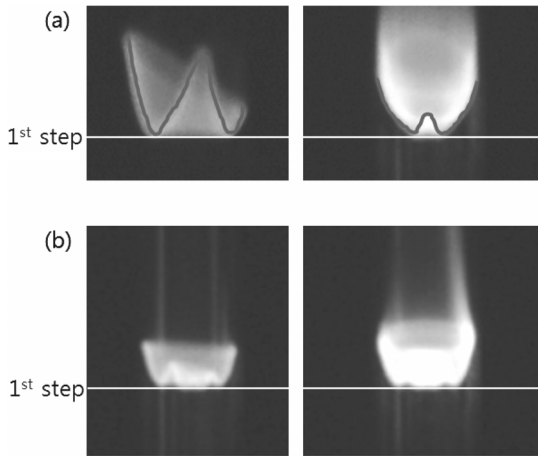


Fig. 6. Flame shapes and instability on the surface of burner-II at $\phi=0.7$ (left: methane, right: propane); (a) noise occur (52 cm/s, 68 cm/s), (b) stable (44 cm/s, 62 cm/s).

따라 화염의 두께가 얇아져 유동 재순환으로부터 영향을 크게 받고 있는 것으로 나타났으며, 연료 및 당량비에 관계없이 유속을 감소시켜 화염 면이 모든 관 표면에 안착하였을 때 비로소 소음이 안정화되는 것을 확인하였다. 이를 고려할 때 소음이 발생하지 않는 조건은 상대적으로 유속이 낮고 화염의 길이가 상대적으로 짧은 조건에 해당한다. 유속의 감소로 인해 유동 재순환 주기가 감소하고, 추가적인 화염의 굴곡 형성으로 인해 유동에 응답하는 화염의 특성 역시 변화하여 소음이 발생하지 않은 것으로 이해할 수 있다.

3.3. 다중관 내 화염의 특성

관내에서 화염의 역화 현상은 관의 개수 증가에 따라 달라졌는데 2중관을 가진 연소기-I의 경우 사용 연료에 관계없이 Fig. 7(a)와 같이 모든 당량비 조건에서 외부 관의 화염은 내부 관의 역화 조건과는 약간의 차이를 보이며, 주로 바깥쪽 유로에서 먼저 역화 되는 경향이 관찰되었다. 이에 반해 3중관을 가진 연소기-II의 경우에는 Fig. 7(b)와 같이 중심 유로에서의 화염이 가장 빠른 전파속도를 가지고 가장자리에서 낮은 전파속도를 가지게 됨이 관찰되었다. 이러한 차이는 화염의 구조적 특성을 배제할 경우 세 가지 관점에서 고찰될 수 있다. 1) 가장자리에 있는 유로에서의 화염은 내부 유로에 비해 열 손실이 클 것이다. 2) 채널의 특성 길이 스케일이 감소하면 채널에 작용하는 마찰력이 증가하여 평균유속이 감소할 수 있어서 화염의 전파속도가 상대적으로 클 수 있다. 3) 이와 반대로 채널의 간격이 감소함에 따라 화염이 소염 조건에 근접함으로써 전파속도가 감소

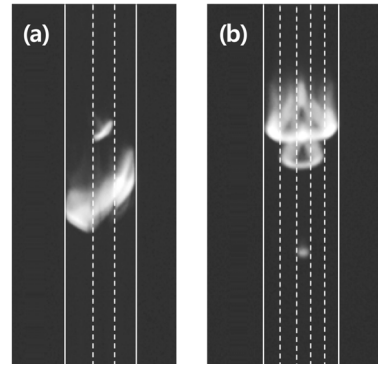


Fig. 7. Flash back behavior in tubes ($\phi=0.65$, Propane); (a) burner-I (39 cm/s), (b) burner-II (34 cm/s).

하는 경향도 발생할 수 있다.

그런데 이러한 가정(1)의 경우 2중관 조건에서와 같이 가장자리 화염이 상류에 존재하는 것을 설명할 수 없다. 가정(2)의 경우에는 주로 면적/표면 길이 비 (A/p)의 감소에 따라 채널 내부 마찰이 커지고 유속이 감소할 것을 예상할 수 있다. 그런데 Table 1에 나타난 A/p 비를 고려하면 이중관의 조건에서 내부 유로의 유속이 상대적으로 낮을 것을 예상할 수 있는데, 내부 유로의 화염은 Fig. 7(a)와 같이 상대적으로 하류에 위치하게 되어 설명이 불가하다. 가정 (3)의 경우에는 2중관에서의 Fig. 7(a)의 현상을 설명할 수 있지만, 3중관에서는 A/p 비의 감소에도 불구하고 Fig. 7(b)와 같이 화염이 상류에 존재하게 되는 것을 설명할 수 없다.

따라서 화염의 구조적 특성을 배제한 단순 모델로는 다중채널 내부의 화염 안정화 특성을 설명하기 어려움을 예상할 수 있다. 그런데, Table 1에 나타난 변수 중에서 화염의 유로 내부 분포와 일치하는 경향을 가지는 것은 유로의 간격에 해당하는 w 값이 있다. 2중관에서는 내부 유로가 낮은 w 값을 가지며, 3중관에서는 중심 유로가 상대적으로 높은 w 값을 가지게 되는데, 화염의 분포가 이에 반대하는 경향을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 유로 내부의 화염의 전파 특성을 고려할 때 채널의 간격 변화가 화염의 구조 변화에 영향을 미쳐 전파속도의 변화를 유발하는 것을 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다. 그런데, 이처럼 채널의 간격 변화에 따라 화염의 구조적 특성에 변화가 발생한다면 기존의 열전달 및 채널 내부 평균 유속의 변화만 고려한 다공성 연소기 내부 화염의 전파 특성 해석 모델들은 수정될 필요가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 실험 방법은 내부 화염의 분포를 직접 관찰할 수 있다는 점에서 향후에 보다 현실적인 다공성 연소기 내부 화염의 안정화 해석 모델을 개발하는 데 유용한 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

외관을 고정시킨 채 연소기 내부 관 개수를 변경함에 따른 연소 공간 변화가 화염의 안정화 및 전파 거동에 미치는 영향을 석영관 연소기 내부에서의 단일관과 다중관 구간으로 구분하여 연소기 내 화염을 직접 관찰을 통해 알아보았다. 연소속도와 같은 고유 특성에 의해 화염 안정화 영역 및 전파 특성이 당량비와 유속에 따라 결정되었으며, 당량비와 유속이 증가함에 따라 화염의 길이가 상대적으로 길어져 연소기 다중관 표면에서의 유동 불균일성과 국부적인 유동 재순환 주기가 화염에 영향을 미쳐 진동 및 소음과 같은 화염 불안정성이 나타나는 것을 확인하였다. 하지만, 다중관 구간 내 화염 전파 특성은 열전달 및 채널 내부 평균 유속 변화만 고려한 다공성 연소기 내부 화염 전파특성에 관한 기본적 해석 모델과는 다르게 연소기의 길이 스케일에 의해 연소기 내부 화염의 구조적 특성이 변화할 수 있음을 연소기 내부를 직접 관찰함으로써 확인하여 관찰 결과로부터 향후 보다 현실적인 다공성 연소기 내부 화염의 안정화 해석 모델을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 황상순, “다공세라믹 버너를 이용한 표면화염의 연소 및 배기특성”, 한국연소학회 한국연소학회지, 2001, pp. 29-35.
- [2] 이필형, 이재영, 박창수, 박봉일, 황상순, “다공 원통형 버너의 분포판 및 염공 변화에 따른 연소특성, KOSCO SYMPOSIUM 논문집 2009, No. 38, pp. 139-144.
- [3] D. K. Min, H. D. Shin, Laminar premixed flame stabilized inside a honeycomb ceramic, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34(1991), pp. 341-356.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 박승일, 이민정, 김남일, “다공성 연소기 모델로서의 다중 채널 연소기 내부 화염의 안정화 특성 기초 연구”, *대한기계학회논문집(B)*, 35(8), (2011) pp. 815-823.
- [7] 유소, 김남일, “급속확대 채널 예혼합 화염의 연소소음 기초 연구”, *제44회 KOSCO SYMPOSIUM 초록집* (2012), pp.79-81.