

< 논문 >

## 대향류 채널 소형 열재생 연소기의 화염안정 특성에 관한 실험적 연구

조 상 문\* · 김 남 일†

(2007년 3월 12일 접수, 2007년 3월 22일 심사완료)

### An Experimental Study on the Characteristics of Flame Stabilization in a Small Heat-Regenerative Combustor of Counter-Current Channels

Sang Moon Cho and Nam Il Kim

**Key Words :** Micro Combustor(초소형 연소기), Heat-Regeneration(열재생), Flame Stabilization(화염안정화), Flame Characteristics(화염특성)

#### Abstract

Flame characteristics of a methane-air premixed flame stabilized in a heat-regenerative small combustor were investigated experimentally. A small combustor having two counter-current shallow channels and a combustion space at one side was developed. In which the channel-gap was less the ordinary quenching distance of a stoichiometric methane-air premixed flame. Two design parameters of channel gap and thickness of the middle wall, which is located between two channels for unburned and burned gases, were varied. Flame stabilization conditions and characteristic flame behaviors were experimentally examined. Conclusively, Blowout conditions were governed mostly by the scale of the combustion space, and flashback conditions into the channel are dominated by the channel gap. Surface temperatures of the combustor were between 100 to 500°C. Additionally, two distinctive flame stabilization modes of radiation and well-stirred-reaction were observed and their applicability was discussed.

#### 1. 서 론

최근의 소형기계시스템의 개발과 함께 이를 위한 적절한 에너지 및 동력 공급원이 요구되었으며, 그 일환으로 화석연료의 높은 에너지 밀도를 이용하는 소형 연소기(마이크로 연소기)의 개발이 시도되고 있다. 이러한 소형 연소기의 개발에 있어 가장 중요한 핵심기술로서 가스연소의 공간 한계를 극복하기 위한 방안들이 연구되고 있다.

가스연소의 공간 한계에 대해서는 선행연구자들에 의해 매우 오랜 기간 동안 연구가 진행되어 왔는데, 그 결과는 주로 화염의 역화(flashback)를 방지함으로써 연소기기의 안전성을 확보하는 방안으로 응용되었다.<sup>(1-3)</sup> 이에 반해 화염을 미소공간에 유지하고자 하는 마이크로 연소기 개발 목표는 화염 역화를 적극적으로 수용하는 상반된 목표를 가지고 수행될 필요가 있다.

기존의 연구에 따르면 일반적인 경우에 화염이 전파할 수 있는 최소공간의 길이스케일인 소멸거리(quenching distance)는 화염의 두께와 비례관계에 있으며, 화염의 두께는 연소속도에 반비례함이 알려져 있다.<sup>(1, 2, 3, 4)</sup> 따라서 연소기의 소형화를 위해서는 필연적으로 화염의 두께 감소가 이루어져야 하는데, 이를 위한 방안으로 연소속도가 빠른 수

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부  
E-mail : nikim@cau.ac.kr  
TEL : (02)820-5753 FAX : (02)814-9476

\* 중앙대학교 기계공학부 대학원

소 등의 특정한 예혼합기를 사용하거나 연소공간 내의 압력 상승을 통한 스케일의 감소가 직접적으로 응용 가능하다. 이와는 별도로 벽면에서의 가스연소의 종결을 방지하기 위한 방안으로 촉매연소가 적용되기도 하는데, 기존의 다양한 연구에 대해 Vican 과 Fernandez-Pello 가 정리한 바 있다.<sup>(6,9)</sup>

그러나 위에 언급한 특정 예혼합기, 고압 연소, 촉매연소를 이용하는 방안들은 임의의 연소기 설계 조건에서도 추가적으로 적용될 수 있다는 점에서 연소기의 소형화를 위한 효과적인 형상을 설계하기 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 이러한 요구에 근거한 가장 기본적인 연소기 소형화의 방안으로 화염으로부터 발생한 열을 적극적으로 회수하여 이용하려는 시도가 진행되어 왔다. 기존의 연구를 통해 다양한 형태의 열재생 연소기가 개발되었는데, 가장 대표적인 경우가 스위스롤(Swiss-roll) 타입의 연소기로 중앙에 연소공간이 있고 다수의 채널이 나선형으로 분포한 구조가 된다<sup>(7-11)</sup>. 하지만 이러한 스위스롤 타입의 연소기는 열 재생 효과는 우수하지만 연소기를 설계하는데 필요한 각종 설계변수의 효과를 직접적으로 관찰하고 이론화하는 것에 어려움이 있다.<sup>(10,11)</sup> 또한 스위스롤 연소기는 특유의 복잡한 형상으로 인해 연소기 소형화를 위한 제작 경비가 과도하게 증가하는 것도 단점이 될 수 있다.

마이크로 연소기 개발에 있어서 또 하나의 중요한 특징은 마이크로 연소기를 응용하고자 하는 다양한 목적에 따라 공간이나 온도범위 등의 요구사항이 매우 다양한 제약을 받게 된다는 것이다. 또한, 연소기의 소형화에 따라 체적당 표면적의 비가 증가하며 그 결과 연소현상은 연소기 형상에 더욱 의존하게 된다. 따라서 마이크로 연소기의 개발에 있어 제한된 개별 사양에 관한 설계 변수의 효과를 적절히 평가하는 것이 매우 중요하며, 가장 대표적인 형상인 평판형 연소기에 대해 검토하는 것은 열재생 소형 연소기 개발과 관련된 연구의 출발점이 될 것이다.

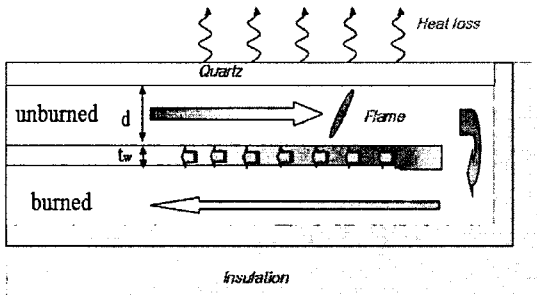


Fig. 1 Schematic diagram of a counter-current heat-regenerative combustor

이러한 평판형 열재생 연소기는 열전모듈(TEM, thermo electronic module)을 이용한 초소형 발전시스템의 개발에 있어서도 중요한 의미를 가진다. 열전모듈(TEM)의 효과적 적용을 위해서는 서로 다른 열원간의 열전달 면적의 확보가 용이해야 하는데, Fig. 1에 보인 평판형 열재생 마이크로 연소기를 사용하면 상부채널을 통한 미연가스의 유입으로 저온 열원부를 얻을 수 있고 하부의 연소가스가 흐르는 부분은 상대적으로 높은 온도를 가지므로 고온 열원부로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 평판형 소형 열재생 연소기와 열전모듈(TEM)을 다수 적층함으로써 소형 연소기의 공간효율을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 평판 구조의 열재생과 화염의 안정화에 대해서 다루게 되는데, 이에 관해서는 기존에 이론 연구를 통해 고찰된 바가 있지만,<sup>(12,13)</sup> 소형 연소공간에 대해서 1 차원 점근법 등을 이용한 해석의 불합리성은 차치하더라도 실제 실험을 통한 기술개발의 문제점을 파악하는 것은 매우 중요하다. 평판형 연소기 개발에 있어 가장 중요한 설계 인자는 채널의 간격( $d$ )과 상부와 하부채널 사이의 열전달이 발생하는 중간판의 두께( $t_w$ )가 될 것이다. 이에 본 연구에서는 연소기의 채널 간격과 중간판의 두께를 주요 설계 변수로 설정하고 그에 따른 화염의 안정화특성 및 화염거동에 관해 실험적으로 연구하였다.

## 2. 실험 방법

사용된 연료는 순수메탄(99.999%)이고 수분이 제거된 압축공기를 산화제로 사용하였다. 예혼합기의 유량 조절을 위해서는 2개의 MFC(mass flow controller)를 사용하였으며 충분한 혼합을 위해 별도의 혼합장치로 거쳐서 연소기로 유입되도록 하였다. 실험에 사용된 평균속도( $V_m$ )는 상온 대기압에서 투입된 예혼합기의 체적을 미연가스가 흐르는 상부채널의 단면적으로 나눈 값이다.

연소기는 다양한 두께의 스테인리스판을 레이저 가공하고 이를 적절히 적층, 체결하여 제작하였다. 적층 구조는 Fig. 2에 나타내었는데, 점선으로 표시된 화살표는 유체의 투입과 배출 사이의 경로를 보여주고 있다. 예혼합 유체는 2개의 투입구를 통해 연소기 내로 투입되고 유동방향의 속도 균일성을 유지하기 위해 채널로 유입되기 직전 일부 구간에서 채널에 비해 좁게 설계된 슬롯부를 통과하도록 제작되었다. 채널에 투입된 미연가스는 중간판을 기준으로 위쪽의 상부채널을 통해 좌측에서 우측으로 흐르게 되는데, 중간판 아래쪽의 하부채널을 통해서도 그 반대 방향으로 흐르게 된다. 유동 방향의 변화가 발생하는 우측 끝단부는

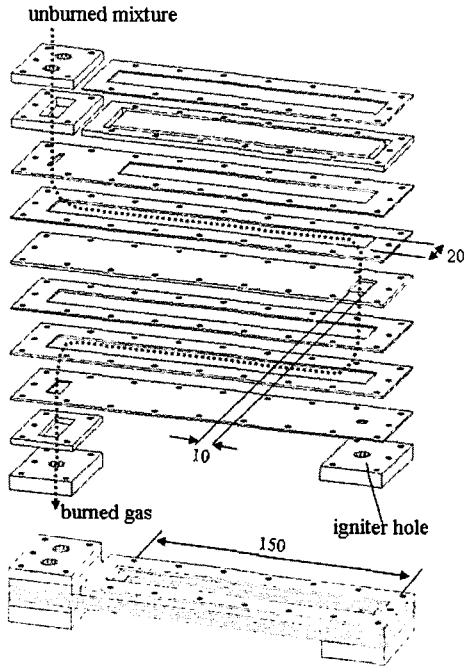


Fig. 2 Assembly of a combustor

채널에 비해 상대적으로 큰 공간을 가지게 된다. 이 공간에는 점화를 위한 점화플러그(spark igniter)가 설치되며 초기 점화를 비롯한 다수의 화염 안정화가 이 공간에서 이루어지게 되므로 이를 연소 공간이라 정의하였다. 연소공간에서 연소한 가스는 하부 채널을 통해 흘러가는 동안 상부의 미연 가스로 열을 전달하게 된다.

채널의 폭은 상부채널과 하부채널 모두 20mm이며, 우측 끝단부의 연소공간은 길이 10mm, 폭 20mm의 크기를 가지며 그 높이는 상하부 채널과 중간판의 크기 설정에 의해 결정된다. 다양한 두께의 스테인리스판을 선택함으로써 채널의 간격( $d$ )과 중간판의 두께( $t_w$ )를 변화시킬 수 있는데, 실험에 사용된 조건들이 Table 1에 제시되었다. 각 조건을 나타내는 기호는 채널의 평균 간격과 중간판의 두께를 사용하여 표현하였다. 예를 들어 'T10D11' 조건의 경우 중간판 두께는 1.0mm 이고 채널 간격은 약 1.1mm 임을 의미하는데, 이 조건을 기준으로 중간판의 두께와 채널간격을 바꾸면서 화염안정화 특성을 실험적으로 관찰하였다.

참고로 본 실험에서 설정한 모든 조건에서 채널의 간격은 표준상태에서의 메탄-공기 이론혼합비 조건의 소염 거리(2.5mm)보다 작다.<sup>(2)</sup> 따라서 채널 내부에 화염이 존재하기 위해서는 재생열이 화염을 유지하기 위해 반드시 사용되어야 한다. 그리고 모든 실험 조건에서 연소공간의 높이도 2.7~5.4mm 정도의 범위에서 이론혼합비 조건에서

Table 1 Burner configuration of the experimental cases (gap of the channel,  $d_u$ : upstream channel,  $d_d$ : downstream channel,  $t_w$ : thickness of the middle wall)

$d_u : d_d$	$t_w$ 0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
1.12 : 0.6 mm		T10D09 <sup>(a)</sup>	
1.12 : 1.12 mm	T05D11 <sup>(a)</sup>	T10D11	T15D11 <sup>(b)</sup>
1.60 : 1.60 mm	T05D16 <sup>(b)</sup>	T10D16	
2.22 : 2.22 mm		T10D22	

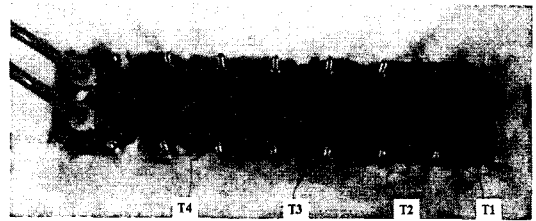


Fig. 3 Image of an insulated combustor and thermocouples

의 소염거리와 큰 차이는 없다. 따라서 초기 점화는 이론혼합비 근처에서 이루어질 필요가 있다. 또한 밀폐된 공간에서 예혼합기를 점화하면 소규모의 폭발이 연소공간 내에 발생하면서 화염면을 채널 내부로 순간적으로 압입하게 되고 곧 소멸된다. 따라서 점화시에는 연속적인 스파크의 발생이 필요하였다.

연소기의 윗면을 제외한 모든 면은 단열재를 이용하여 단열조건을 유지하였으며 윗면은 내부의 화염 관찰을 위해 3mm 두께의 석영판을 사용하였다. 연소기의 길이방향으로 4 개의 열전대를 설치하고 출구부에도 열전대를 추가 설치하였다. 실험에 사용된 실제 연소기의 모습을 Fig. 3에 보였다. 설치된 열전대는 K-타입으로 외경 0.5mm이다. 측정된 온도는 연속 기록계(Graphtec, GL500)로 모니터링 되었으며, 각 지점의 온도 측정결과가 2°C/min 이내로 감소한 조건에서 화염의 안정화 조건을 평가하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 중간판의 두께와 화염의 안정성

중간판 두께 변화에 따른 화염안정화 특성을 실험하였다. 채널의 간격은 1.12mm 로 소염거리의 절반 정도의 크기를 가지도록 고정되었으며, 중간판 두께 변화 시 실험 범위의 모든 조건에서 화염은 채널내부로 전파하지 않고 연소공간 내부에 존

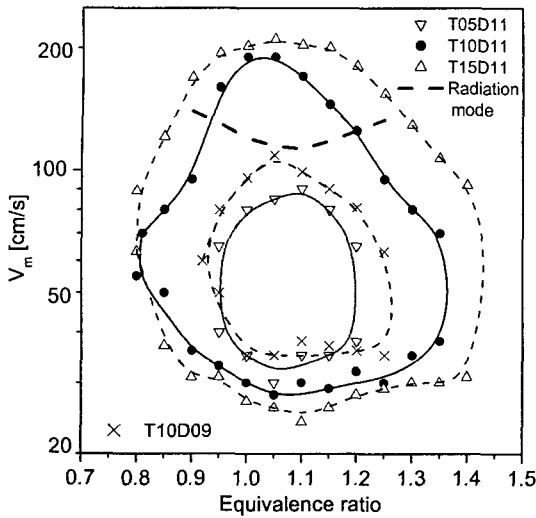


Fig. 4 Effect of the middle wall thickness on the flame stabilization conditions

재하였다. 이는 결과적으로 1.12mm 채널 간격에서 행해진 모든 조건에서 재생열이 채널내 화염의 소화를 억제할 수 있을 정도로 충분히 공급되지 않았음을 의미한다. 유량의 감소에 따라 화염면은 채널 끝단에 매우 가까워 지다가 소화 현상이 발생하였으며, 유량의 증가에 따라서 혹은 당량비의 변화에 따라 더 이상 화염을 연소공간 내에 유지할 수 없는 조건에 이르게 된다. 이러한 화염 안정화의 경계 조건을 Fig. 4에 나타내었으며, 각 조건에 해당하는 폐곡선의 내부조건에서 화염은 안정적으로 연소기 내에 존재하였다.

상부 미연가스와 하부 연소가스의 중간에 위치한 중간판은 고온의 연소가스로부터의 열이 저온의 미연가스로 이동하는 주된 경로가 된다. 열전달 이론에 따르면, 임의의 온도차를 가지는 두 채널 간의 열전달량은 중간판의 두께에 반비례 관계를 가지게 되고 화염을 안정화시킬 수 있는 조건은 재생열의 크기에 비례할 것이므로 중간판의 두께를 증가시키면 화염의 안정화 영역은 감소할 것으로 예상되었다.

하지만, 실험 결과는 이와는 반대의 결과를 보이고 있다. 우선 중간판이 0.5mm 로 가장 얇은 조건인 'T05D11' 경우에 대한 화염의 안정화 조건은 당량비 1 근처에서 평균속도의 최소값이 약 35 cm/s, 최대값이 약 80cm/s 정도의 범위를 가지며 안정화 영역이 Table 1의 실험조건 중에서 가장 좁게 분포한다. 중간판의 두께가 증가함에 따라 화염의 안정화 영역은 비례적으로 넓어짐을 알 수 있다. 이 때 Fig. 4의 세로축은 로그 스케일이므로 화염안정화를 위한 평균속도의 최소값 차이에 비해 평균속도의 최대값의 차이는 상대적으로 큰 차

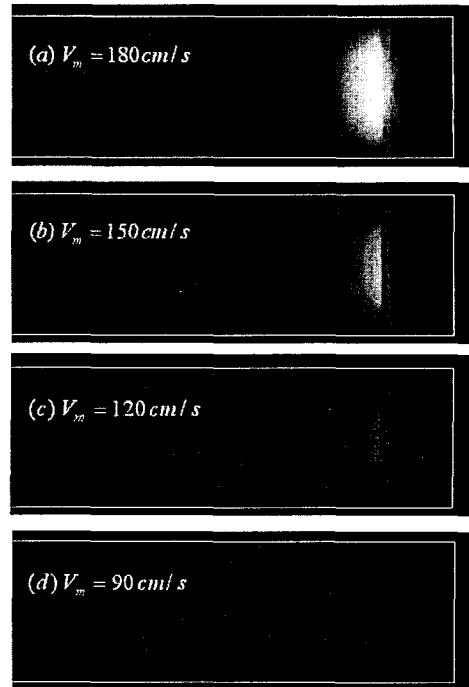


Fig. 5 Direct images of the flames stabilized in a radiative mode at the condition of 'T10D11' ( $t_w=1.0$  mm,  $d=1.12$  mm)

이를 가지는 것을 알 수 있다. 특히 평균 연소속도가 100cm/s 이상인 조건에서 화염이 안정화되는 경우 이론 당량비 근처에서 급격한 화염안정화 영역의 확대를 관찰할 수 있었다. 따라서, 낮은 속도에서의 안정화 한계는 중간판의 두께에 무관한 반면, 높은 속도에서의 안정화 한계는 중간판 두께 증가에 의해 급격히 증가함을 알 수 있다.

특히 이와 같이 화염의 안정화 영역이 급격히 확대되는 조건에서는 Fig. 5에 보인 바와 같이 중간판의 가열로 인한 가시광선의 발생을 눈으로 관찰할 수 있다. 흑체 가시광선 방출이 약 600°C 이상에서 발생하는 것을 감안할 때 중간판의 온도가 그 이상으로 상승하는 것을 짐작할 수 있다. 이와 같은 조건에서 복사에 의한 채널 내부의 열전달의 증대를 기대할 수 있어서 해당 조건을 복사모드 (radiation mode)라고 정의하였다. 그런데, 복사모드에서도 화염은 채널 내부로 전파하지 않고 연소공간 내에 존재하게 되며 화염면에 인접한 중간판만 가열되고 있음을 알 수 있다. 따라서 중간판의 가열은 화염에 의한 직접적인 열전달 보다는 하부채널을 흐르는 연소가스에 의한 가열로 판단된다. 이러한 조건에서 화염안정화는 결국 복사열전달에 의한 채널의 길이방향(유동방향) 열전달에 의해 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 이러한 중간판의

작열 현상은 실제의 마이크로 연소기 응용에 있어서도 광전소자(photo-electronic device)를 이용한 발전 방식에 응용 가능할 것으로 판단된다.

3.2 채널 간격과 화염의 안정성

앞에서 중간판 두께변화 실험은 채널간격이 1.12mm 인 경우에 대해 수행되었으며 채널 내 화염 전파는 관찰되지 않았지만, 채널의 간격을 증가함에 따라 화염을 채널 내부에 유지시키기 위해 추가로 필요한 재생열의 크기가 감소하게 되고 그 결과 화염은 소화되지 않고 채널 내로 전파하는 현상을 관찰할 수 있게 된다. 이러한 조건을 역화(flashback)라 정의하였고 그 조건을 나타낸 것이 Fig. 6 이다. 채널 간격이 1.6mm 인 'T10D16' 조건에서 이론당량비로 조성된 화염은 평균유속이 약 65cm/s 인 조건에서 역화가 발생하였으며 당량비 0.9~1.25 범위에서 이러한 역화를 관찰할 수 있었다. 채널 간격이 2.2mm 인 'T10D22' 경우에는 역화가 발생하는 당량비 범위가 0.78~1.44 정도로서 'T10D16' 조건에 비해서는 상당히 확대되지만 이론당량비 근처에서의 역화조건은 채널의 간격에 무관하게 거의 같은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

기존의 연구 결과에 따르면 열 재생이 없는 일반적인 경우 채널의 간격이 증가할수록 채널 내로 역화가 쉽게 발생하게 되므로 역화조건에서는 평균유속이 채널의 간격에 비례하는 값을 가지는 것이 알려져 있다.<sup>(1),(2)</sup> 하지만 본 연구의 결과는 이론당량비 조건에서의 채널의 간격 증가는 역화 조건에 거의 영향을 미치지 않음을 보이고 있다. 이는 동일한 평균유속의 조건에서 채널 간격의 증가

와 함께 채널 내부를 흐르는 전체 유량이 증가하는 반면 열전달이 발생하는 중간판의 표면적은 변하지 않으므로 열재생에 의한 미연가스의 온도 상승이 감소하여 결과적으로 채널 간격의 증가 효과를 상쇄한 것으로 볼 수 있다.

반면에 이론당량비에서 벗어난 혼합비 조건에서는 채널 간격의 변화가 명확한 차이를 보이고 있다. 이는 평균 속도와 화염의 전파속도의 감소로 인해 중간판을 통한 열전달이 이루어질 수 있는 충분한 시간이 확보되기 때문으로 생각된다. 따라서 대항류 열재생 연소기의 역화 조건이 채널의 간격 증가에 의해 일관되게 확대되기 위해서는 충분한 길이의 채널이 요구됨을 짐작할 수 있다.

3.3 연소공간 크기와 화염의 안정성

연소공간의 크기가 화염면의 형상에 미치는 효과를 관찰하기 위해 연소공간 크기가 같고 채널의 간격 혹은 중간판의 두께가 다른 추가적인 형상조건에서 화염안정화 특성을 실험하였다. Table 1 에서 보인 'T10D09<sup>(a)</sup>'의 경우는 중간판의 두께가 1.0mm, 채널의 간격이 평균 0.9mm 이므로 연소공간의 내부 높이는 1.0+2×0.9=2.8mm 이다. 이는 'T05D11<sup>(a)</sup>' 경우의 연소공간 내부 높이 0.5+2×1.1=2.7mm 와 매우 유사하다. 마찬가지로 Table 1 에 나타낸 새로운 조건 'T05D16<sup>(b)</sup>'은 'T15D11<sup>(b)</sup>' 조건과 동일한 연소공간의 높이를 가진다(3.7mm).

이처럼 동일한 연소공간을 가지는 경우에 대한 화염안정화 조건의 비교 결과가 Fig. 4 와 Fig. 6 에 추가로 제시되었다. 'T10D09<sup>(a)</sup>' 조건에서는 화염의 역화는 관찰되지 않았으므로 연소공간 내에 화염이 안정화 되는 조건을 동일한 연소공간을 가지는 경우인 'T05D11<sup>(a)</sup>' 조건과 비교하였다. 그 결과 Fig. 4 에서 보인 바와 같이 두 조건 모두에서 매우 근접한 결과를 보이고 있는 반면, 동일한 중간판 두께를 가지는 'T10D11'과는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 중간판의 두께 보다는 연소공간의 크기가 화염의 안정화에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 의미한다.

마찬가지로 'T05D16<sup>(b)</sup>' 조건과 'T15D11<sup>(b)</sup>' 조건의 역화특성을 비교함으로써 연소공간의 효과를 평가할 수 있다. 그런데, Fig. 6 에 보이듯이 'T15D11<sup>(b)</sup>'의 조건에서는 화염역화가 발생하지 않는 반면, 'T05D16<sup>(b)</sup>' 조건에서는 역화가 발생한다. 따라서 역화조건은 연소공간의 크기보다 채널의 간격에 의해 지배됨을 알 수 있다. 그런데 'T05D16<sup>(b)</sup>' 조건과 동일한 채널간격을 가지는 'T10D16'에 비해 역화조건이 넓게 분포하고 있으며 그 조건은 오히려 더 큰 채널 간격을 가지는 'T10D22' 조건과 매우 유사함을 알 수 있다. 결국, 중간판의 두께 감소가 화염의 역화를 더욱 쉽게 발생시키는데, 이는 두께 감소로 인한 연소가스와

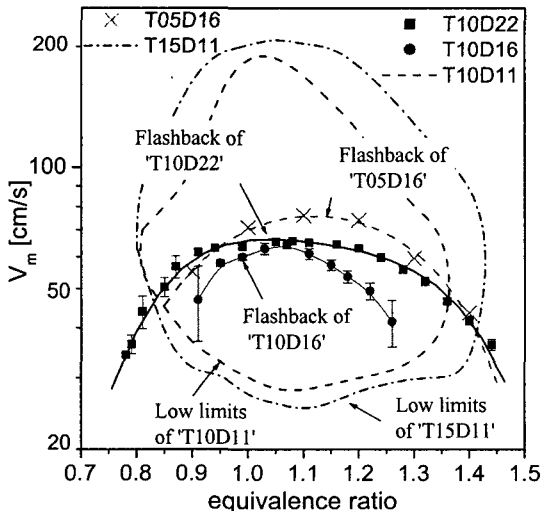


Fig. 6 Effect of channel gap on the flame stabilization conditions

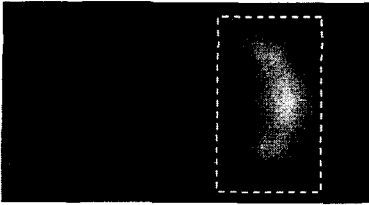


Fig. 7 Direct photograph of a vibrating flame (well stirred mode) in combustion space at the case of 'T05D16.' Flow velocity was 300cm/s

미연가스간의 열전달의 상승효과가 소염을 억제하는데 직접적인 역할을 하는 것으로 판단된다.

지금까지 소개된 결과 이외에 추가적으로 관찰된 흥미로운 사실은 'T05D16<sup>(b)</sup>'의 조건에서는 실험범위 내에서 화염의 날림(blowout)이 발생하지 않았다는 점이다. 이러한 조건에서 유량을 증가시키면 화염의 선단은 부분적으로 중간판의 끝단에서 멀어지는 부분적인 화염부상이 발생하게 되고 유량을 계속 증가시키기에 따라 화염의 진동이 증대되고 결국 화염 전체가 중간판의 끝단에서 일정거리 이상 떨어져 존재하게 된다. 이 때 화염의 모양을 나타낸 것이 Fig. 7 이다. 점선으로 나타낸 부분이 연소공간에 해당한다. 유량의 증대에 따라 화염은 더욱 높은 진동수를 가지게 되고 직접사진에는 광도가 낮은 화염이 넓은 영역에 분포한 형태로 나타난다. 이러한 조건에서 화염의 상당부분은 연소기 끝단의 재순환 영역에 유지되는 것으로 판단되는데, 재순환 영역의 고온 연소가스는 소염을 억제할 뿐 아니라 물질 확산을 증대시킴으로써 궁극적으로 이상적인 혼합연소(well-stirred reaction)의 특징을 가질 것으로 기대된다. 이러한 이상적인 혼합연소는 유사한 형상의 연소기에 대한 기존의 이론 연구<sup>(13)</sup>에서 연소 모델로 다루어진 바 있다. 또한 이러한 조건에서는 연소공간 근처의 연소기 온도가 유량에 따라 증가하는 일반적인 경향이 둔화되는데, 이는 화염 사이의 공간을 통해 미연가스의 상당 부분이 누출되어 실제 연소공간에서의 발열량이 유량에 비례하지 않기 때문으로 판단된다.

3.4 채널 내부의 화염 안정화

화염이 전도성 재질의 채널 내부로 전파하는 조건에서 화염을 일정 위치에 안정화 시키는 것은 이론적으로 가능하다. 그런데 대항류 열재생 버너의 경우에 연소공간을 기준으로 화염은 항상 미연가스 쪽 채널 내에만 안정화 될 수 있다. 화염의 열적 안정화 기구를 쉽게 설명하기 위해 열재생 과정을 단순화한 것이 Fig. 8 이다. 실제 열전달은 연소기 벽면 등의 다양한 경로를 통해 복잡하게 발생하고 있지만, 설명의 편의를 위해 연소기 외

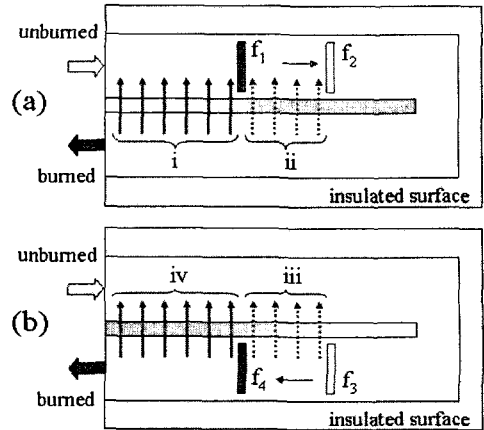


Fig. 8 The mechanism of thermal flame stabilization inside of the channel



Fig. 9 Direct photos of the flame in the upstream channel at the 'T05D11' case

부로는 모두 단열된 상태이고 열전달은 중간판을 통해서 수직 방향으로만 발생한다고 단순화하였다.

우선 화염이 상류채널에 안정화된 경우를 Fig. 8(a)에 보였다. 화염이 초기에  $f_1$  위치에 있는 경우 화염의 우측에 위치한 공간에서 외부는 모두 단열 상태이므로 연소가스의 온도 감소는 없다. 따라서 중간판을 통한 열손실도 무시할 수 있게 되고 열재생은 화염면 상류 쪽에서만 발생하는데 i-영역에서 열전달이 발생한다. 그런데 화염이 유동 교란 등의 이유로 하류의  $f_2$  위치로 이동하였다고 가정하면, 화염의 상류 쪽 길이가 증대하고 이와 함께 열전달은 i-영역 뿐만 아니라 ii-영역까지 발생하게 된다. 따라서 화염 상류의 미연가스의 온도가 상승하게 되고 화염은 전파속도의 증대로 원래의 위치로 전파하게 되어 스스로 안정화되는 경향을 가지고 있다.

이와 반대로 화염이 하류에 위치한 경우를 Fig. 8(b)에 나타내었는데, 화염이  $f_3$  의 위치에서  $f_4$  의 위치로 교란 받았을 때 화염으로부터 화염상류로 열전달이 발생하는 영역은 초기에 iii-영역과 iv-영역 전체에서 열전달이 발생하다가 교란 후에는 iv-영역에서만 열전달이 발생하게 되고 미연가스의 온도는 그 차이에 해당하는 만큼 감소하게 된다. 따라서 화염은 전파속도의 감소로 더욱 하류로 이동하는 경향을 가지게 되어 스스로 안정화

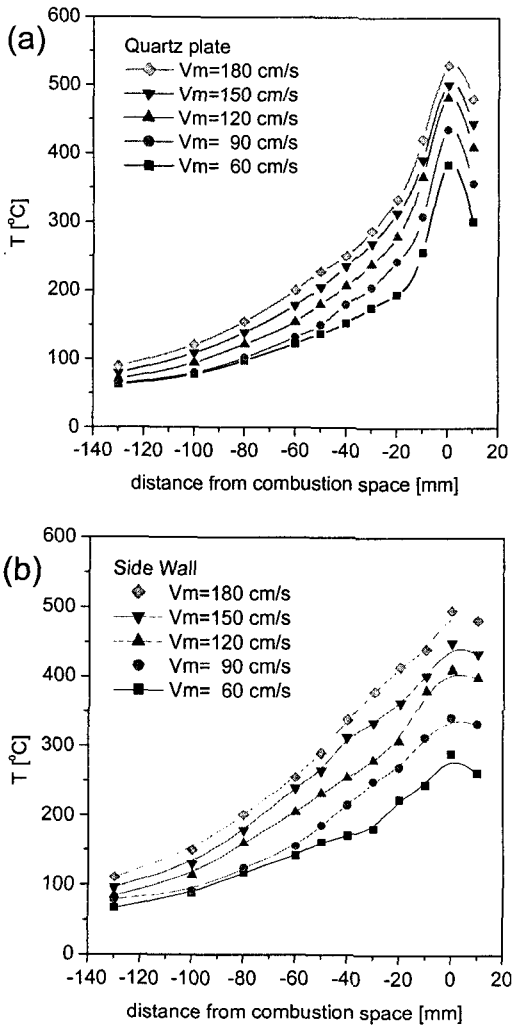


Fig. 10 Temperature distribution at the 'T10D11' case. (a) on the surface of the quartz plate, (b) on the surface of the stainless side wall

될 수 없게 된다.

이러한 열적 안정성 이론에 의하면 상류 유속을 조절함으로써 화염을 상부채널 내의 임의의 위치에 안정화시킬 수 있지만 실제로는 대부분 조건에서 화염을 채널 내에 안정화시키지 못했다. 이는 화염과 연소기의 열적 응답시간의 차이가 실제 실험의 제어 범위를 벗어나기 때문으로 판단되는데, 이에 대해서는 기존의 연구에서 논의되었다.<sup>(4)</sup> 스테인리스 중간판의 두께가 가장 얇은 조건 ( $t_w=0.5\text{mm}$ )에서 실제 연소기의 상류 채널 내에 화염이 전파하는 모양을 Fig. 9 에 나타내었다. 화염이 채널 내를 느린 속도로 전파할 때 채널은 가열되고 화염 직후에는 채널이 적열될 정도로 고온이

유지된다. 이론혼합비에 가까운 조건에서는 화염의 온도가 매우 높아서 채널에 변형이 발생하거나 중간판이 녹아버리기도 한다.

### 3.5 연소기의 온도분포

마이크로 연소기의 적용 방안으로 열전모듈(TEM)을 적층하는 경우 연소기 표면의 온도 분포를 파악하는 것이 열전모듈(TEM)의 사양 결정에 중요한 기준이 된다. 연소기의 길이 방향으로 중간판의 끝단(혹은 연소공간의 시작) 지점을 기준으로 상류 쪽으로의 온도 분포를 Fig. 10 에 나타내었다. 사용된 연소기의 형상은 Table 1 의 'T10D11' 조건에 해당하며 이론혼합비의 조건에서 측정되었다. 연소기의 상부 쪽 석영판 표면에서의 온도분포를 연소기의 온도가 정상(steady)상태에 이른 후 일정 간격으로 측정된 결과가 Fig. 10(a)이며, 연소기의 측면 스테인리스의 길이방향 온도분포 측정 결과가 Fig. 10(b)이다.

전반적으로 측정된 온도는 100~500°C 범위에 있다. 두 경우 모두 연소공간에서 멀어질수록 온도가 감소하며, 평균유속이 증가할수록 각 지점에서의 온도는 증가한다. 평균유속의 증가는 투입되는 연료의 증가를 의미하므로 연소기 내부에서 발생하는 열의 증가를 의미하기 때문이다. 석영판과 스테인리스의 온도를 비교해 보면 화염 근처에서는 석영판의 온도가 조금 더 높고, 화염에서 멀어질수록 스테인리스의 온도가 더욱 높아짐을 알 수 있다. 이는 두 재료의 열전도 특성의 차이에 기인하는데 석영의 열전도율은 대략 5W/mK 인 반면 스테인리스의 열전도율은 15W/mK 정도로 대략 3 배 정도 크기 때문이다. 이러한 결과는 마이크로연소기를 열원으로 활용한 소형발전시스템을 구성할 때 적절한 온도범위의 열전모듈(TEM)을 선택하는 기준이 될 수 있다.

## 4. 결론

마이크로 연소기 개발을 위한 설계변수의 결정을 위해 평판형 대항류 열재생 소형 연소기를 제작하고 대표적인 설계인자인 채널의 간격과 열전달이 주로 발생하는 중간판의 두께를 변화시키며 화염안정화 특성을 실험하였다. 채널 간격이 1.12mm 로 일정한 경우 중간판의 두께 증가는 화염의 안정화 영역을 증대시키게 되는데 이는 주로 연소공간의 크기 증대를 통한 화염의 유동안정성에 기여하기 때문으로 판단된다. 반면에 채널 간격의 증대는 화염의 채널내부로의 역화를 가능하게 하는데, 이러한 조건에서 중간판의 두께 감소는 열재생의 증가를 통해 화염의 역화조건을 확대하는 데 기여한다. 대표적 조건에서 연소기 표면은 100~500°C의 온도범위를 가지며, 유량의 증가

와 함께 연소기의 온도는 상승한다. 고유량의 고온 조건에서 채널의 작열 현상으로 인한 복사모드의 활성화는 화염의 안정성 영역을 확대한다. 또한 특정 형상에서는 유동 재순환 영역을 중심으로 이상적인 혼합연소(well-stirred reaction) 현상이 발생하고 화염의 날림(blowout)을 획기적으로 감소시키게 된다. 이러한 결과들은 다양한 방식으로 마이크로 연소기를 적용할 수 있는 가능성을 제시한다.

## 후 기

본 논문은 한국기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Lewis, B., and von Elbe, G., 1987, *Combustion Flames and Explosions of Gases*, 3<sup>rd</sup>, Academic press inc. p. 233.
- (2) Turns, S. R., 2000, *An Introduction to Combustion*, 2<sup>nd</sup>, McGraw-Hill, p. 253. 287.
- (3) Williams, F. A., 1985, *Combustion Theory*, 2<sup>nd</sup>, pp. 279~284.
- (4) Kim, N.I., Kataoka, T., Maruta, K., and Maruyama, S., 2005, "Flammability limits of stationary flames in tubes at low pressure," *Combust. Flame* 141, pp. 78~88.
- (5) Vican, J., Gajdeczko, F.L., Dryer, F.L., Milius, F.L., Aksay, I.A., and Yetter, R.A., 2002, "Development of a microreactor as a thermal source for microelectromechanical systems power generation," *Proc. Combust. Inst.* 29, pp. 909~916.
- (6) Fernandez-Pello, A. C., 2002, "Micropower generation using combustion: Issues and approaches," *Proc. Combust. Inst.* 29, pp. 883~899.
- (7) Lloyd, S. A. and Weinberg, F. J., 1974, "A burner for mixtures of very low heat content," *Nature* 251, pp. 47~49.
- (8) Ahn, J.M., Eastwood, C., Sitzki, L., and Ronney, P.D., 2005, "Gas-phase and catalytic combustion in heat-recirculating burners," *Proc. Combust. Inst.* 30, pp. 2463~2472.
- (9) Kim, N.I., Kato, S., Kataoka, T., Yokomori, T., Maruyama, S., Hujimori, T., and Maruta, K., 2005, "Flame stabilization of small Swiss-roll combustors as heaters," *Combust. Flame* 141, pp. 229~240.
- (10) Chen, M., and Buckmaster, J., 2004, "Modelling of combustion and heat transfer in 'Swiss roll' micro-scale combustors," *Combust. Theory Model.* 8, pp. 701~720.
- (11) Kim, N.I., Aizumi, S., and Maruta, K., 2007, "Development and scale effects of small Swiss-roll Combustors," *Proc. Combust. Inst.* 31, pp. 3243~3250.
- (12) Ju, Y. G. and Choi, C. W., 2003, "An analysis of sub-limit flame dynamics using opposite propagation flames in mesoscale channels," *Combust. Flame* 133, pp. 483~493.
- (13) Ronney, P. D., 2003, "Analysis of non-adiabatic heat-recirculating combustors," *Combust. Flame* 135, pp. 421~439.