

## 고온에서의 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 연구

김기백\*, 이경호\*, 홍영택\*, 권오채\*<sup>†</sup>

\*성균관대학교 기계공학부

### Stability limits of premixed microflames at elevated temperatures

Ki Baek Kim\*, Kyoung Ho Lee\*, Young Taek Hong\* and Oh Chae Kwon\*<sup>†</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University 300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon, Kyunggi-do 440-746, Korea

#### ABSTRACT

In order to provide the database for designing microcombustors, the combustion characteristics of premixed methane and propane air microflames at normal and elevated temperatures and atmospheric pressure generated on a microtube were studied experimentally and computationally. The stability limits of premixed microflames and the propensity of the microflames near the stability limits were experimentally determined, while the structure of the microflame at the fuel-leanest limit was obtained using a two-dimensional CFD simulation with a reduced kinetic mechanism. For all the microflames, the stability limits were observed only in the fuel-rich region. Results also show substantial extension of stability limits with elevated temperature that is realistic condition for micro fuel processing and significant fuel dilution immediately near the tube exit due to a low Peclet number times Lewis number effect.

**KEY WORDS** : Microcombustors(초소형 연소기), Micro fuel processing(초소형 연료개질), Microflames(초소형 화염), Stability limits(연소안정한계)

#### 1. 서 론

최근 기존의 휴대폰, PDA 등의 휴대용 전자장비에 더 많은 전력을 요구하는 멀티미디어 기능이 추가되면서 가볍고 오래가는 전력 공급원에 대한 요구가 급증하고 있다. 현재 2차 전지로 널

리 사용되고 있는 리튬-이온 배터리는 저 에너지 밀도, 긴 충전시간, 짧은 충전수명 등의 단점이 있어 이를 대체하기 위한 방법의 일환으로 초소형 연료전지<sup>1)</sup>의 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 가지 형태의 연료전지 중에서 직접메탄올 연료전지(DMFCs)<sup>2)</sup>가 초소형 연료전지로 개발하기에 적합한 것으로 알려져 있으며, 최근 다른 연료전지에 비해 출력밀도가 높다는 이점으로 초소형

<sup>†</sup>Corresponding author : okwon@skku.edu

리포머가 장착된 초소형 고분자전해질 연료전지 (PEMFCs)에 대한 연구도 진행되고 있다.<sup>3)</sup>

초소형 리포머는 탄화수소계연료의 연소열을 이용하여 수증기와 연료의 촉매반응으로부터 수소를 발생한다. 따라서 초소형 리포머의 핵심부분으로 초소형 연소기에 대한 연구가 필수적이다. 초소형 연소기를 개발하기 위해서는 해결되어야 할 다양한 기술적 문제점들이 있지만 가장 중요한 것은 안정적인 연소를 보장하는 것이다. 연소기의 크기가 초소형화 되면 연소기의 부피대비 표면적비가 증가하여 연소기 벽면으로의 열손실이 증가하기 때문에 연소기의 특성길이가 소염길이와 비슷해질 경우 연소를 안정적으로 유지하기가 어려워진다. 이러한 초소형 화염의 소염을 해결하기 위한 방안으로 촉매연소방식과 열재순환 연소방식이 제시되었다.<sup>4)</sup>

초소형 연소기의 연소 안정성을 향상시키기 위해서는 초소형 화염에 대한 기초연구가 선행되어야 한다. 초소형 연소기 내에서 혼합 특성길이가 매우 짧고 반응유동이 층류 특성을 갖는다는 점에서 예혼합 연소 모드가 안정적 연소에 유리할 것으로 예측되지만 초소형 화염의 기초연구는 주로 비예혼합 화염에 국한되어 왔다.<sup>5,6)</sup>

Yuasa 등<sup>7)</sup>은 상온조건에서 내경 0.4 mm 이하의 초소형 튜브 위에 생성되는 수소-공기, 메탄-공기, 프로판-공기 예혼합 화염에 대한 연소안정한계를 측정하였는데, 모든 화염의 안정한계는 연료가 과농한 영역에서 나타났다. 이에 대한 원인으로 튜브와 화염 사이의 연료손실을 제시하였지만 이는 실험이나 수치해석을 통한 화염구조의 획득을 통해서 확인이 가능하다. 수치해석의 경우 2차원 또는 3차원의 계산을 통해 연료 분포 및 온도 분포를 관찰해야하며, 이러한 계산결과는 초소형 화염 기초데이터를 제공한다. 또한 열손실을 최소화 하기위해 초소형 리포머에 적용 가능한 열재순환 연소를 이용한 경우 혼합기는 상온이 아닌 예열된 상태이므로, 예열이 적용된 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계에 대한 기초데이터는 초소형 연소기 설계에 필수적이라고 할 수 있

다.

본 연구에서는 초소형 리포머용 연소기에 적용 가능한 초소형 튜브 위에 형성되는 탄화수소계-공기 예혼합 초소형 화염의 연소특성을 이해하고자 하며 다음과 같은 세부 목적을 갖는다. 1) 상온에서 초소형 튜브의 내경에 따른 메탄-공기의 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정, 2) 열재순환 개념을 적용한 초소형 연료 리포머의 작동 조건에 해당하는 고온에서의 연료-공기 혼합기에 대한 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정, 3) 연료에 따른 예혼합 초소형 화염의 특성을 비교하기 위해 메탄-공기 및 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정, 4) Yuasa 등<sup>7)</sup>이 예측한 예혼합 초소형 화염의 연료손실 특성을 검증하기 위해 초소형 화염과 매크로 화염의 CFD 시뮬레이션을 통한 화염구조 비교.

## 2. 실험 및 계산 방법

단일 초소형 튜브 위에서 예혼합 초소형 화염은 단순한 형태이지만 실제적인 초소형 리포머용 연소기에 적용 가능한 형태이다. Fig. 1은 수소를 생산하기위한 초소형 리포머에 적용된 초소형 연소기의 개념도로서 열손실을 최소화하기 위해 열재순환개념이 적용된 경우이다.

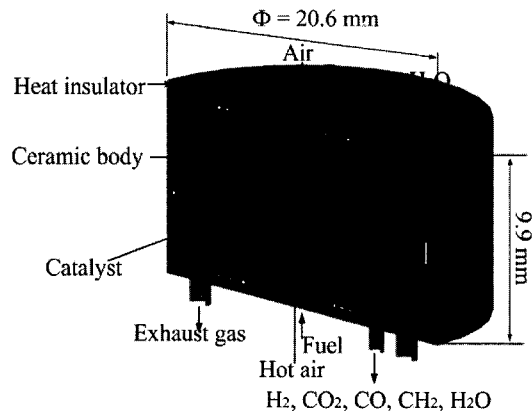


Fig. 1 Conceptual design of a heat-recirculated combustor for H<sub>2</sub>-generating micro fuel-reforming

## 2.1 실험 장치 및 방법

예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 특성을 실험하기 위해 Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 혼합기 유량 제어/공급부, 예열기, 초소형 튜브와 초소형 화염의 형상을 얻기 위한 디지털 카메라로 구성된다.

연료와 공기는 튜브출구 당량비와 분사속도 조건에 따라 각각에 맞는 질량유량계(5~100 sccm)를 사용하여 단일 초소형 튜브에 공급하였다. 내경  $d = 200, 300, 420 \mu\text{m}$ 인 초소형 튜브는 스테인리스 스틸(SS-304)로 가공하였으며, 분사된 혼합기에 스파크점화를 사용하여 화염을 발생시켰다. 예열된 예혼합기 초소형 화염의 연소안정한계를 측정하기 위해 예열기를 노즐 주위에 설치하였으며 예열기에 의한 대류현상이 화염에 영향을 미치지 않도록 예열기 주위를 단열재로 감쌌다. 예혼합기의 분사온도는 T-Type의 열전대를 사용하여 측정하였다.

연소안정한계는 고정된 당량비  $\phi$ 에서 분사속도  $V$ 를 조절하여 소염이 되는 조건에서 결정되었으며 초소형 튜브로의 열손실에 의한 소염영역과 혼합기의 빠른 유속, 즉 혼합기 잔류시간이 충분하지 않아 생기는 소염영역이 관찰되었다.

혼합기의 온도  $T = 298 - 500 \text{ K}$ 에 대해  $\phi = 30$ 까지 메탄-공기 및 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계를 측정하였으며, 실험조건에 따라 4~6회에 걸친 평균 데이터를 이용하여 최종실험 결과를 얻었다.

## 2.2 계산 방법

Yuasa 등<sup>7)</sup>에 의해 예측된 예혼합 초소형 화염의 연료손실 특성을 검증하기 위해 유한체적법에 기반을 둔 상용 CFD 코드인 Fluent 6.2를 사용하여 예혼합 초소형 화염의 구조를 예측하였다.<sup>8)</sup> 지배방정식으로 축대칭 원통좌표계, 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속, 화학종, 에너지 방정식을 사용하였고, 열화학적 물성치는 CHEMKIN<sup>9)</sup> 데이터베이스를 이용하였다. 메탄-공기의 반응은

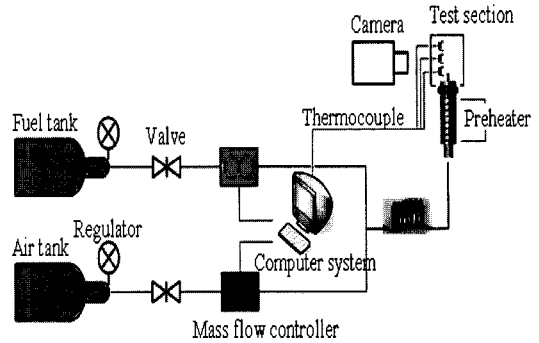


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for the premixed microcombustion.

17개의 화학종이 포함되어있는 메탄-산소의 가역 25단계 반응 메커니즘을 사용하여 계산되었다.<sup>10)</sup> 계산영역은 반경방향과 축방향에 각각 40 d와 60 d까지 고려하였으며 5,000개의 계산격자가 사용되었다.

본 연구에서는 측정된 메탄-공기의 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 중 가장 연료희박인 조건으로 정의되는 임계점에서의 화염구조를 16대의 컴퓨터(CPU 3.0 GHz/1대)로 이루어진 병렬 계산시스템을 사용하여 수치적으로 예측하였다. 또한 매크로 예혼합 화염의 수치해석을 통해 초소형 화염의 구조특성을 비교 연구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 상온에서의 메탄-공기 예혼합 초소형 화염

Fig. 3은 초소형 튜브 내경에 따른 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정결과이다. Yuasa 등<sup>7)</sup>의 연구에서 관찰된 바와 같이 C형 곡선 형태의 예혼합 초소형 화염 연소안정한계를 관찰할 수 있다. 연소안정한계의 상부 가지는 초소형 튜브에서 분사되는 혼합기의 빠른 유속, 즉 불충분한 잔류시간에 따른 lift된 화염의 소염한계이고 하부 가지는 초소형 튜브 벽으로의 열손실에 따른 화염의 소염한계이다. 예혼합 초소형 화염의 모든 연소안정한계는 연료 과농한 영역에 존재하는데 이는 연료 희박 영역에도 연소안정한계가 존재하

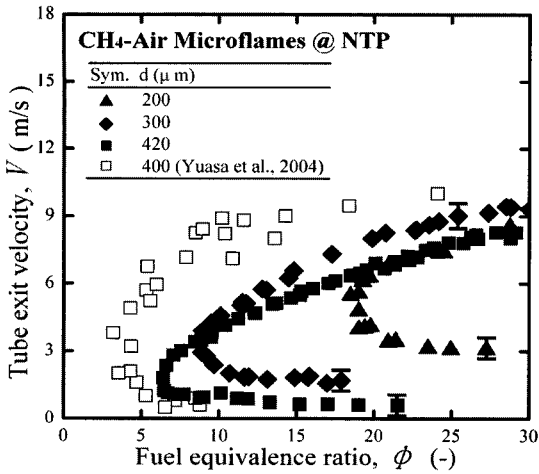


Fig. 3 Measured stability limits of premixed CH<sub>4</sub>-air microflames on the microtubes of d = 200, 300 and 420 μm at NTP

는 매크로 스케일의 예혼합 초소형 화염과는 구별되는 예혼합 초소형 화염의 특징이다.

Fig. 4는 상온에서의 메탄-공기 예혼합 초소형 화염(d = 420 μm)의 사진을 보여준다. 각각은 Fig. 3에서의 화염안정영역, 상부연소한계, 하부연소한계, 임계점 근처에서의 화염을 나타낸다.

초소형 화염의 상부연소한계에서는 불충분한 잔류시간으로 인하여 화염이 다소 lift off 되어있고 하부연소한계에서는 튜브와 주위로의 열손실로 인하여 매우 작은 화염이 관찰된다. 하부연소한계에서의 화염은 매크로 화염에 비해서 매우 작고 평평하다. 이것은 튜브의 작은 크기로 인하여 화염의 크기와 부력의 영향이 작기 때문인 것으로 보인다. 임계점 부근의 화염은 하부연소한계에서의 화염과 비슷해 보이나 줄어드는 당량비에 비해 늘어난 속도의 영향을 받아 화염의 크기가 다소 증가하였다.

초소형 튜브 내경이 증가하면 연소안정한계는 여전히 연료과농 영역에 존재하지만 연료희박 영역 방향으로 또한 낮은 V 조건으로 확장된다. 이러한 경향은 초소형 튜브에서 분사된 혼합기의 advection 효과가 증가하여 분사된 혼합기 중 연료가 대기 중으로 확산되는 정도가 상대적으로

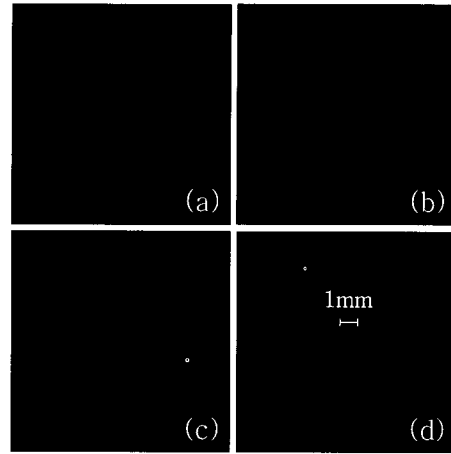


Fig. 4 Photographs of premixed CH<sub>4</sub>-air microflames on the microtube of d = 420 μm at NTP: (a) φ = 10.0 and V = 1.78 m/s (in the stable region), (b) φ = 10.0 and V = 4.00 m/s (near the upper stability limit), (c) φ = 10.0 and V = 0.90 m/s (near the lower stability limit), and (d) φ = 6.4 and V = 1.78 m/s (near the critical point)

감소하기 때문으로 예측된다. 즉, 대기 중으로 분사된 혼합기 중 연료희석이 덜 이루어져 튜브 벽면으로의 열손실에 의한 소멸효과가 상대적으로 감소된 영역에 화염이 형성되기 때문이다. 이에 대해서는 다음 절에서 구체적으로 논의될 것이다.

Yuasa 등<sup>7)</sup>의 실험결과가 Fig. 3에 포함되어 있는데 본 실험결과와 정성적으로는 동일한 결과를 보여주나 정량적으로 차이를 보이고 있다. 이에 대한 원인은 분명하지 않으나 향후 연소안정한계에 대한 수치적 예측을 통해 분석이 가능할 것으로 보인다.

### 3.2 메탄-공기 예혼합 초소형 화염의 구조

예혼합 초소형 화염과 초소형 튜브 사이의 연료손실 특성을 CFD 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 예측된 예혼합 초소형 화염의 연료 및 온도 분포 결과를 매크로 예혼합화염과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 분사조건은 메탄-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 실험을 통해서 측정된 임계점 조건(φ = 6.4, V = 1.78 m/s)을 선택하였으며, 매크로 예혼합 화염의 경우 초소형 튜브 내경

( $d = 420 \mu\text{m}$ ) 의 10배인  $d = 4.2 \text{ mm}$ 인 튜브에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 5 (a)의 초소형 화염에 대한 연료 분포는 혼합기 분사 후 약 2 d 하류 부분에서 이미  $\phi = 1.0$ 에 도달하는 것을 보여주는데 이는 Fig. 5 (b)에 관찰되는 바와 같이 약 20 d 부근에서  $\phi = 1.0$ 에 도달하는 매크로 화염의 비하면 분사 후 매우 짧은 거리에서 연료의 주위 공기로의 확산이 일어나는 것을 확인시키는 것이다. 이는 예혼합 초소형 화염의 경우 분사되는 혼합기의 advection에 비해 상대적으로 혼합기 내 연료의 주위로의 확산이 매우 빨리 일어나는 반면 튜브로의 화염의 열손실이 존재하기 때문에 혼합기가 충분한 당량비와 분사 속도를 갖지 않는다면 소염거리(화염이 소멸될 때의 화염하단과 튜브사이의 거리로 정의) 이하에서 화염이 생성될 수밖에 없어 결국 열손실을 극복하지 못하고 소멸되는 메커니즘을 보여주는 것이다. 이와 같은 메커니즘으로 예혼합 초소형 화염에서는 매크로 화염과 달리 연료과농 영역에서만 연소안정한계를 보여주는 특성을 설명할 수 있다.

이러한 관점에서 임계점 포함 연소안정한계의 하부 가지는 분사 혼합기의 advection에 대한 연료 확산(회색)의 상대효과를 정량화하는 무차원 파라미터를 도입하여 나타내는 것이 유용할 것으로 판단되었다. Peclet 수( $\equiv Vd/a$ ;  $a$ 는 열확산계수)와 Lewis 수( $\equiv \alpha/D$ ;  $D$ 는 연료의  $\text{N}_2$ 로의 질량 확산계수)의 곱인  $PeLe$ 를 도입하였으며 Fig. 3에서 보여준 연소안정한계를 Fig. 6에 이 파라미터를 사용하여 나타내었다. 모든  $d$ 에 대한 하부 가지는  $PeLe \approx 10$ 로 접근함을 알 수 있다. 반면 상부 가지는 열손실과는 무관하게 혼합기의 짧은 잔류시간(높은 스트레치 효과)으로 인해 관찰되는 연소안정한계이므로 모든 경우 한 값으로 근접하는  $PeLe$ 가 관찰되지는 않는다.

### 3.3 예열된 메탄-공기 예혼합 초소형 화염

초소형 튜브 내경  $d = 420, 300, 200 \mu\text{m}$ 에 대한 예열된 메탄-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안

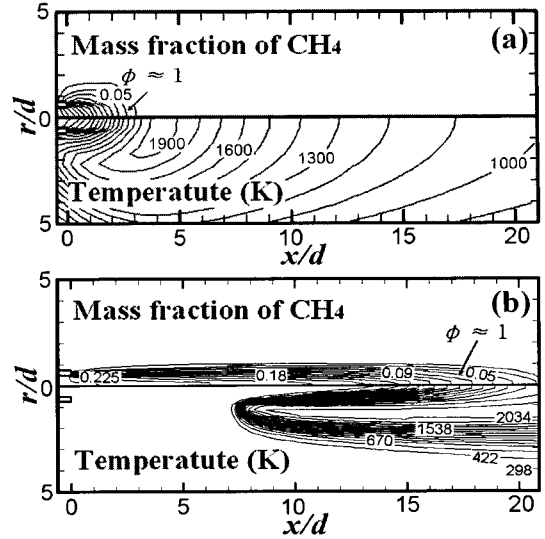


Fig. 5 Predicted mass fractions of  $\text{CH}_4$  and temperature for premixed  $\text{CH}_4$ -air flames on tubes of (a)  $d = 420 \mu\text{m}$  and (b)  $d = 4.2 \text{ mm}$  at NTP:  $\phi = 6.4$  and  $V = 1.78 \text{ m/s}$

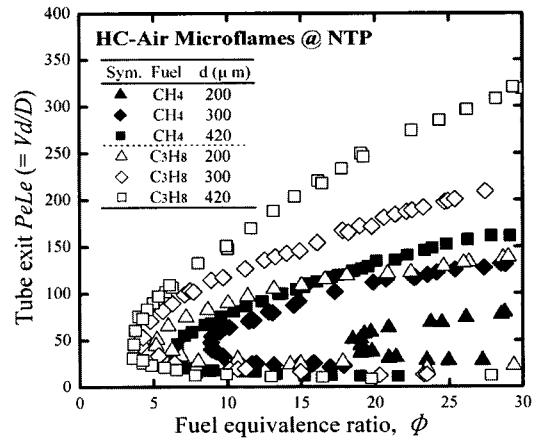


Fig. 6 Measured stability limits of premixed  $\text{CH}_4$ - and  $\text{C}_3\text{H}_8$ -air microflames on the microtubes of  $d = 200, 300$  and  $420 \mu\text{m}$  at NTP in a  $PeLe$ - $\phi$  diagram.

정 한계를 측정하였으며 그 결과를 상온에서의 결과와 함께 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 상승된 온도가 연소를 강화시켜 연소안정한계가 전반적으로 확장됨을 보여준다. 그러나 연소안정한계의 하부 가지는 상온의 연소안정한계와 거

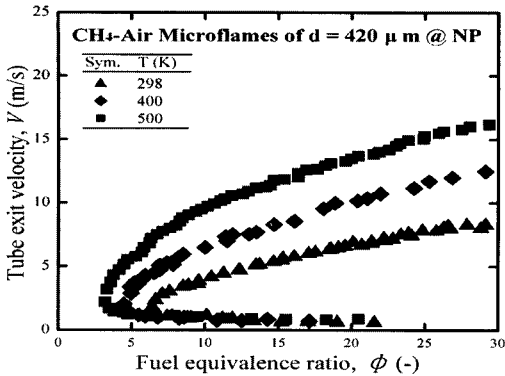


Fig. 7 Measured stability limits of premixed CH<sub>4</sub>-air microflames on a microtube of  $d = 420 \mu\text{m}$  at  $T = 298, 400$  and  $500 \text{ K}$  and NP

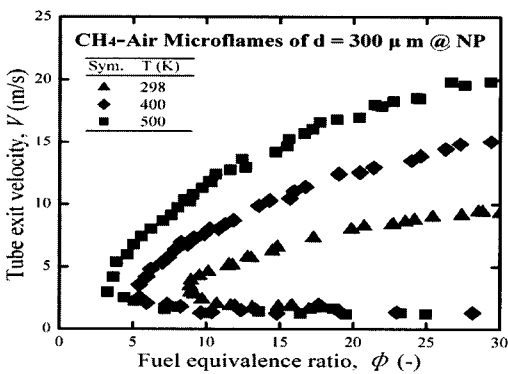


Fig. 8 Measured stability limits of premixed CH<sub>4</sub>-air microflames on a microtube of  $d = 300 \mu\text{m}$  at  $T = 298, 400$  and  $500 \text{ K}$  and NP

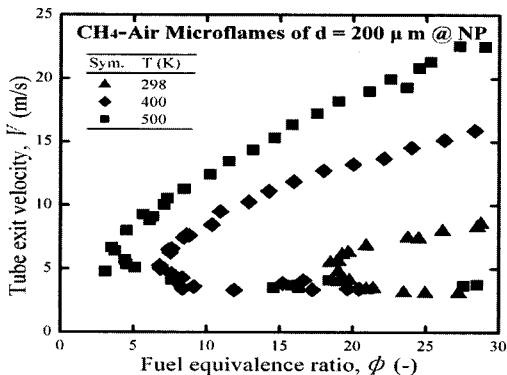


Fig. 9 Measured stability limits of premixed CH<sub>4</sub>-air microflames on a microtube of  $d = 200 \mu\text{m}$  at  $T = 298, 400$  and  $500 \text{ K}$  and NP

의 일치하는 것으로 관찰되는데 이는 상승된 혼합기 온도가 연소를 강화시키고 열손실을 약화시키지만 동시에 연료의 확산도 증가시켜 결국 이러한 효과가 상쇄된 결과이다. 반면 연소안정한계의 상부 가지의 확장은 혼합기 온도 상승에 의한 연소강화가 높은 advection 조건에서 연료의 확산 효과를 상대적으로 약화시키기 때문에 관찰된다. Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9에서 PeLe 대신 V가 사용된 이유는 혼합기 온도가 다른 조건을 비교할 때는 3.2절에서 설명한 advection-연료 확산-열손실 메커니즘 중 소염거리의 변화로 열손실 부분에 대한 정량적 비교가 어려워 PeLe를 사용하는 것이 무의미해지기 때문이다. 마지막으로 각각의 튜브 d에 대해서 500 K까지 예열된 혼합기의 연소안정한계의 임계점은 상온과 달리 서로 거의 일치하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 d 감소에 의한 advection 대비 연료 확산 증가와 튜브로의 열손실에 의해 소염되는 메커니즘이 상승된 혼합기 온도 조건에서 매우 짧아진 소염거리로 인해 더 이상 중요하지 않기 때문이다.

### 3.4 프로판-공기 예혼합 초소형 화염

연료에 따른 연소안정한계를 알아보기 위하여 메탄-공기의 예혼합 초소형 화염과 다른 확산특성을<sup>11)</sup> 갖는 프로판-공기 예혼합 초소형 화염에 대한 연소안정한계 측정을 수행하였다. 이에 대한 결과를 Fig. 6에 메탄-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계와 함께 나타내었다. 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계는 메탄-공기 예혼합 화염의 연소안정한계의 특성과 유사하다. 또한 메탄-공기 예혼합 화염과 마찬가지로  $PeLe \approx 10$ 에 접근하는 결과는 PeLe가 연료와 상관없이 주어진 혼합기의 온도만 동일하다면 유용하게 사용될 수 있는 파라미터라는 것을 보여준다. 반면 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 경우 메탄-공기 예혼합 초소형 화염과 비교하여 여전히 연료과농 영역 내이긴 하지만 희박 영역 쪽으로 연소안정한계가 확장되었다. 이것은 산화제(공기)

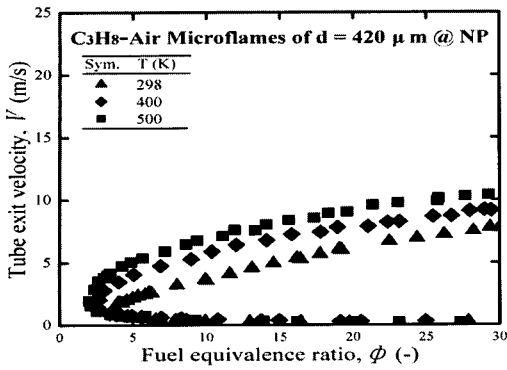


Fig. 10 Measured stability limits of premixed C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-air microflames on the microtube of d = 200 μm at T = 298, 400 and 500 K and NP

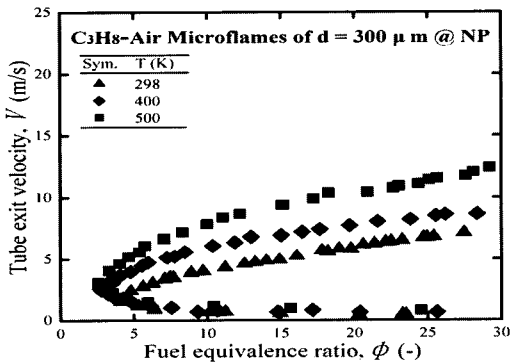


Fig. 11 Measured stability limits of premixed C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-air microflames on the microtube of d = 300 μm at T = 298, 400 and 500 K and NP

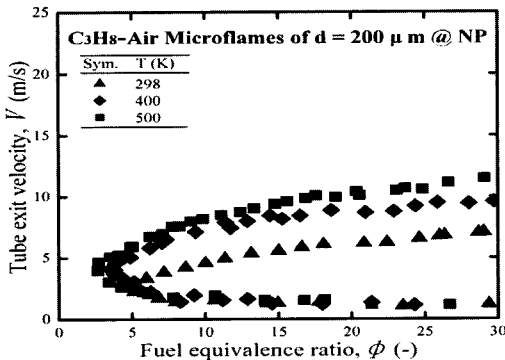


Fig. 12 Measured stability limits of premixed C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-air microflames on the microtube of d = 420 μm at T = 298, 400 and 500 K and NP

기준으로 프로판이 메탄보다 무겁기(분자량의 증가) 때문에 대기 중으로 연료의 확산이 advection 대비 상대적으로 약화되기 때문이다.

마지막으로 초소형 튜브 내경 d = 420, 300, 200 μm에 대한 예열된 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정 한계를 측정하였으며 측정된 결과를 상온에서의 결과와 함께 Fig. 10, Fig. 11, 및 Fig. 12에 나타내었다. 초소형 튜브에서 분사된 혼합기의 온도증가에 따라 연소안정한계영역은 확장되는 등 전반적으로 예열된 메탄-공기 예혼합 초소형 화염과 유사한 경향을 보여준다. 그러나 메탄-공기 예혼합 초소형 화염과 비교하여 상온에서 튜브 내경에 따른 연소안정한계의 변화는 상대적으로 낮은 편이며 이는 역시 프로판과 메탄의 분자량 차이에 의한 결과로 분석된다. 즉 프로판의 낮은 확산성질(N<sub>2</sub>로의 확산계수가 메탄의 약 1/2로 d 변화에 대한 연소안정한계의 민감도가 낮게 나타나는 것이다. 예열된 메탄-공기 화염에 비해서 동일 조건의 프로판-공기 화염의 연소안정한계의 상부한계가 축소되는 이유는 advection 한계에 대한 프로판과 메탄의 분자량차이로 설명할 수 있다.

#### 4. 결론

초소형 리포머용 연소기 설계에 필요한 초소형 튜브 위에 생성되는 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계 측정 및 구조 예측에 대한 기초연구 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 메탄-공기, 프로판-공기 예혼합 초소형 화염의 연소안정한계는 모두 C형 곡선 형태로 연료과농 영역에서 관찰되는데, 상부 한계(가지)는 분사 혼합기의 체류시간의 부족, 즉 강한 스트레치 효과에 의해서, 하부 한계는 튜브로의 열손실에 의해서 관찰되는 것이다.
- 2) CFD 시뮬레이션으로 예측된 예혼합 초소형 화염의 구조는 연소안정한계가 연료과농 영역에서만 관찰되는 원인이 초소형 화염과 튜브

사이의 연료 확산(손실)에 의한 것임을 보여주었고, 초소형 화염의 생성 및 소멸 메커니즘이 분사 혼합기의 advection에 대한 혼합기 중 연료의 주위로의 확산의 상대효과와 튜브로의 열손실과의 균형으로 설명되었다.

3) 예혼합 초소형 화염의 생성 메커니즘으로 연소 안정한계영역이 상온에서 초소형 튜브 내경의 증가할수록, 혼합기의 온도가 증가할수록, 연료의 분자량이 증가할수록 확장되는 것을 설명할 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 에너지관리공단의 2004년도 에너지 기술학술진흥사업 지원을 받아 연구되었음(과제 번호: 2004-03-0012-0-000).

## 참고문헌

- 1) Hebling, C., "Micro fuel cell systems from simulations to system technology," Power MEMS, 2004, p. 137.
- 2) Lu, G. Q. and Wang, C. Y., "Development of micro direct methanol fuel cells for high power applications." J. Power Sources, Vol. 144, 2005, pp. 141-145.
- 3) Shioya, M., "Expectation of micro fuel cell technology," 2nd Int. Hydrogen & Fuel Cell Expo, 2006, pp. 69-85.
- 4) Ahn, J., Eastwood, C., Sitzki, L. and Ronney P. D., "Gas-phase and catalytic combustion in heat recirculating burners," Proc. the Combust. Inst., Vol. 30, 2004, pp. 2463-2472.
- 5) Ida, T., Fuchihatesh, M. and Mizutani, Y., "Microscopic diffusion structures with micro flames," Proc. the 3rd International Symposium on Scale Modeling, ISSM3-E3, 2000.
- 6) Matta, L. M., Neumeier, Y., Lemon, B. and Zinn, B. T., "Characteristics of microscale diffusion flames," Proc. the Combust. Inst., Vol. 29, 2002, pp. 933-939.
- 7) Yuasa, S., Oshimi, K., Nose, H. and Tennichi, Y., "Concept and combustion characteristics of ultramicrocombustors with premixed flame," Proc. the Combust. Inst., Vol. 30, 2004, pp. 2455-2462.
- 8) Fluent Inc., "Fluent 6.2 User's Guide," Fluent Inc., Lebanon, NH, USA, 2005.
- 9) Kee, R. J., Rupley, F. M. and Miller, J. A., "The CHEMKIN thermodynamic data base," Report No. SAND87-8215B, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1992.
- 10) Smooke, M. D. and Giovangigli, V., "Formulation of the Premixed and Nonpremixed Test Problems," In: Smooke M. D., editor. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane-air flames, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1991, pp. 1-28.
- 11) Law, C. K. and Kwon, O. C., "Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen-air flame propagation," Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 29, 2004, pp. 867-879.