

## 과농/희박 메탄 예혼합화염의 안정성에 관한 연구

이 원 남<sup>\*1)</sup> · 서 동 규<sup>2)</sup>

단국대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 단국대학교 대학원<sup>2)</sup>

### A Study on the Stability of Rich/Lean Methane Premixed Flame

Wonnam Lee<sup>\*1)</sup> · Dongkyu Seo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School, Dankook University, Seoul 140-714, Korea

(Received 7 December 2004 / Accepted 31 December 2004)

**Abstract** : The fuel-lean premixed flame has been considered one of the most efficient ways to reduce NO<sub>x</sub> emission during a combustion process. However, it is difficult to achieve stable fuel-lean premixed flames over the wide range of equivalence ratios: therefore, the application of fuel-lean flames to a practical combustion system is rather limited. In this study, the stability characteristics of fuel-lean flames stabilized by fuel-rich flames are investigated experimentally using a slot burner as a part of the basic research for practical application such as lean burn engines. Spontaneous emission of radical species were examined to understand the stability mechanisms of rich-lean premixed flames. The presence of fuel-rich flames could significantly lower the lean limit of fuel-lean flames. The stability of a fuel-lean flame is enhanced with the increase of fuel flow rate in a fuel-rich flame; however, it is not sensitive to the equivalence ratio of fuel-rich flames in the range of 1.2-2.4. The mechanisms of stable rich-lean premixed flames could be understood based on the characteristics of triple flame.

**Key words** : Lean burn(희박 연소), GDI(가솔린 직접 분사), Stratification(성층화), Triple flame(삼중화염), Rich-lean(과농-희박), Slot burner(슬롯 버너)

#### Nomenclature

$u$  : mean nozzle velocity, m/s

$\phi$  : equivalence ratio

#### 1. 서론

자동차 배출가스에 대한 규제가 나날이 엄격해짐에 따라 내연기관을 연구하는 사람들은 고효율 청정연소를 실현하기 위한 연소기술에 대하여 많은 관심을 갖고 있다. 연료희박 예혼합연소(이하 희박

연소)는 이론 공연비보다 연료의 비율을 적게 유지하는 연소기술로서, 온실가스로 분류되어 규제대상이 되고 있는 CO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량을 감소시킬 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 희박연소는 연소가 안정적으로 유지되는 조건이 매우 엄격하기 때문에 실제 자동차 엔진과 같은 실용 연소기에 적용할 경우 안정적 연소를 위한 부가적 시스템이나 조건이 요구되는 경우가 많다.<sup>2)</sup> 특히 엔진에서의 희박연소는 유동장 특성을 이용하거나 가솔린 직접 분사를 통한 성층화(stratification) 기술 등으로 착화 및 연소의 안정화를 구현하고 있다.<sup>3-5)</sup> 이와 같은 성층화를 이용한 희박연소 기술의 다양한 응용을 위

<sup>\*</sup>To whom correspondence should be addressed.  
wlee@dku.edu

해서는 희박화염을 안정시키는 과농화염의 역할에 대한 충분한 이해가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 희박화염을 안정화시키는 연료과농 예혼합화염(이하 과농화염)의 역할을 실험적으로 알아보았다. 이와 같은 연구를 통하여 얻어지는 과농-희박화염의 안정화 메커니즘에 대한 이해는 궁극적으로는 가솔린 엔진에서 연비향상을 위해 채택되는 가솔린 직접 분사 연소에서 연료의 성층화를 통한 연소의 안정화 메커니즘을 이해하는데 도움이 되리라 생각된다.

본 연구에서는 슬롯버너에 형성된 과농화염과 희박화염의 조건에 변화를 주어 과농-희박화염의 안정화 특성이 어떻게 변화하는가를 알아보았다. 또한 과농화염에 의한 희박화염의 안정화 메커니즘을 이해하기 위하여 과농-희박화염 및 희박-희박화염에서 발생하는 라디칼들의 자발광 이미지를 획득하여 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 슬롯버너(slot burner)

실험에 필요한 화염은 과농화염과 희박화염이 공존하는 부분 예혼합화염이며 적절한 버너가 요구된다. 본 연구에서는 평면 화염을 형성하여 전체의 모양을 쉽게 관찰할 수 있는 슬롯 형태의 버너를 사용하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 버너의 개념도이다. 겹쳐진 형상의 판은 반복된 슬롯 형태를 이루게 되어 과농화염과 희박화염을 분리하여 형성시키게 된다. 내부의 4개의 슬롯에서는 희박 혼합기로 공급하고 외부 2개의 슬롯에서는 과농 혼합기로 화염을 형성할 수 있는 다단식 버너로 설계되었다.

노즐에 사용된 재질은 스테인리스 스틸 판(stainless steel plate)으로 열변형과 가공할 때 변형을 막을 수 있도록 1 mm 두께로 사용하였다. 노즐과 노즐 사이의 간격 비율(opening ratio)을 1:1로 맞추어서 노즐 간격은 1 mm 이고 가로 길이는 길이 방향으로 속도분포에 변화가 없는 충분한 길이인 50 mm로 선정했다. 내부 4개의 슬롯에서 동일한 속도가 얻어지도록 완충제(flow buffer)를 설치하였으며 다시 직경 2 mm의 유리구슬 틈새를 통과하면서 동압은 소멸하고 정압만을 갖게 하여 압력차에 의한 균일한

속도 분포로 노즐에 들어가도록 하였다. Photo. 1와 Photo. 2는 각각 슬롯버너의 내부구조와 노즐 부위를 보여주고 있다. Fig. 2는 슬롯 노즐에 형성된 예혼합 화염으로 매우 안정적인 이차원 평면화염을 얻을 수 있었다.

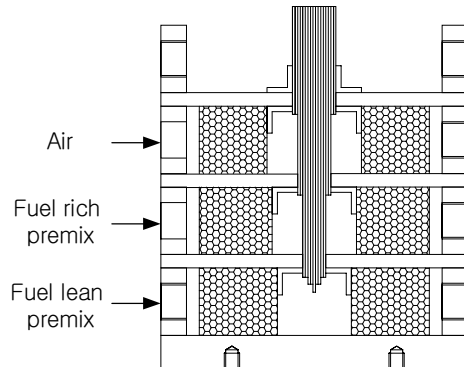


Fig. 1 Schematic of slot burner

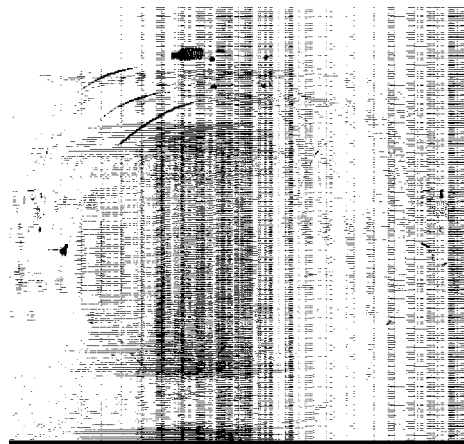


Photo. 1 Inside view of the slot burner

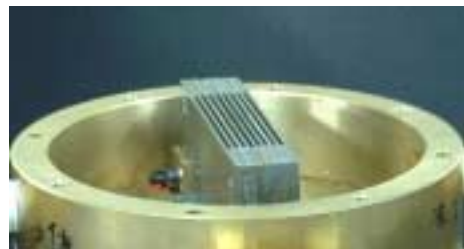


Photo. 2 Slot burner nozzle assembly

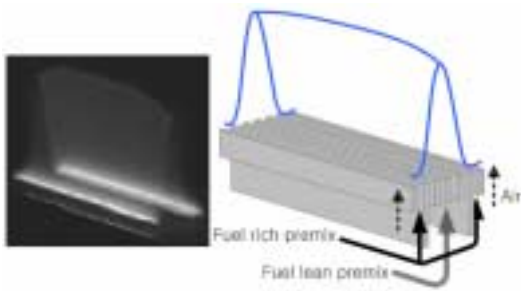


Fig. 2 2-D flame on the slot burner

### 2.2 화염 및 라디칼 이미지

화염 특성을 관찰하기 위하여 직접사진과 라디칼 이미지를 촬영하여 분석하였다. 이차원 평면 화염 특성상 측면에서 화염을 관찰하면 비교적 깨끗한 화염 이미지를 얻을 수 있었다. 희박화염의 연소 특성은 디지털 카메라(Fuji FinePix2400 Zoom)를 사용하여 1600×1200의 해상도를 갖는 직접사진을 촬영하여 알아보았다. 과농-희박화염의 구조적 특성을 알아보기 위한 C<sub>2</sub>, CH 및 OH 라디칼의 자발광 이미지의 획득에는 Nikon(UV, f=105 mm) 렌즈를 사용하는 ICCD(Princeton Instrument) 카메라와 라디칼 각각의 자발광만을 통과시키는 협대역 통과(narrow band pass) 필터를 사용하였다. 이때 사용한 필터의 중심파장은 각각 515 nm(C<sub>2</sub>), 430 nm(CH) 및 306 nm(OH)이며 모든 필터의 FWHM(full width at half maximum)은 10 nm이다. ICCD 카메라를 사용한 이미지 획득과 얻어진 이미지의 분석에는 전용 소프트웨어인 WinVIEW를 사용하였다.

### 2.3 실험방법

슬롯버너에 대한 주위 유동장 영향을 최소화하기 위하여 과농화염 노즐 외부에 유량 8 slpm(standard liter per minute)의 차단공기(shield air)를 사용하여 실험을 수행하였다. 예비 실험을 통하여 이 유량 조건에서는 화염 형상의 변화가 거의 나타나지 않으면서도 과농화염이 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

실험은 과농화염을 원하는 열량과 당량비로 고정한 상태에서 희박화염의 당량비를 변화시키면서 수행되었다. 희박화염의 연료유량을 일정하게 유지하면서 공급되는 공기 유량을 증가시켰으며, 이때 희

박화염의 당량비는 감소하고 유속은 증가하게 된다. 따라서 혼합기의 유속이 증가하고 당량비가 감소하면서 화염전파속도가 느려지고 화염이 점점 길어진다 마침내 화염의 끝이 열리게 된다(flame-tip-open). Fig. 3은 화염 끝이 닫히고 완전한 연소가 이루어지는 경우와 끝이 열리고 불완전 연소가 발생하는 희박화염의 모습을 보여주고 있다.

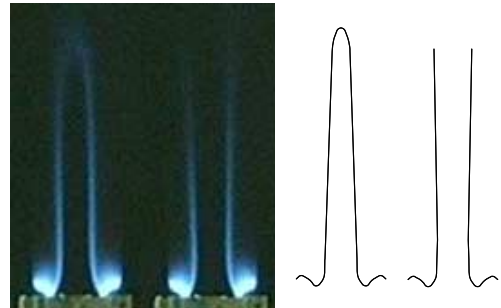


Fig. 3 Flames with flame-tip-closed and open

과농화염이 존재 할 때는 과농화염이 없을 때에 비하여 희박화염의 화염 끝이 열리는 당량비(이하 희박한계 당량비)가 낮아진다. 따라서 이 연구에서는 과농화염 조건을 고정시킨 상태에서 희박화염의 연료유량을 100 sccm(standard cubic centimeter per minute) 씩 증가시키면서 화염의 끝이 열리는 조건의 공기유량을 측정하였다. 이 결과로부터 희박한계 당량비와 노즐출구에서의 평균 속도를 계산하였다. 실험은 주로 메탄(순도 99.9%)을 사용하여 수행되었다. 제한된 조건에서 프로판(순도 99.0% 이상)과 에틸렌(순도 99.0% 이상)을 사용한 실험이 병행되었으며, 이때 과농화염의 연료유량은 저위 발열량 기준으로 메탄화염과 같은 열량이 방출되도록 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 과농-희박 화염의 안정화 특성

외부 슬롯 1 개와 내부 슬롯 2 개에 각각 250 sccm의 연료유량을 공급하고, 외부 슬롯의 화염조건을 당량비 1.3, 출구 평균 속도 0.70 m/s 로 고정한 상태에서 내부 슬롯으로 공기량을 증가 시키면, 내부와 외부 화염 모두 과농화염으로 형성된다. 여기에 내

부화염에 공기유량을 증가시키면 당량비가 1.0에 가까워지면서 내부화염의 화염 전파속도는 최고에 가까워지고 화염면은 노즐에 부착된다. 내부화염의 당량비가 1.0 보다 작아지면 비로소 희박화염이 형성되고 화염 전파속도는 다시 줄어들며 희박화염의 길이는 증가한다. 공기 유량을 늘이면 희박화염의 길이는 계속해서 증가하고 화염의 강도는 약해진다. 희박화염의 당량비가 0.44에 도달하면 화염 선단에 더 이상 존재하지 못하고 화염 끝이 열리게 된다(flame-tip-open). 이 경우에도 화염이 꺼지거나 날림이 관찰되지 않았다. 그러나 실용 연소기에 적용할 경우 이 조건에서는 공급된 연료가 모두 산화되었다고 볼 수 없는 불완전 연소가 발생하는 조건이므로 본 연구에서는 이 때의 당량비를 희박한계 조건으로 설정하였다.

Fig. 4는 과농화염의 연료유량을 슬롯 당 250 sccm 으로 고정하고 당량비를 변화시켰을 때 희박화염의 희박한계(화염 끝이 열리는) 당량비를 보여준다. 과농화염이 순수 공기로 대체되었을 경우 희박한계 당량비가 매우 크게 나타났다. 이때 노즐 출구 속도는 화염 전파속도와 큰 차이를 보이지 않고 화염 전파속도의 연장선 부근에서 나타났다. 그러나 유속이 증가하면 화염 전파속도 보다 빠른 유속에서도 화염이 안정화되었으며 이는 재순환 영역의 발달에 기인한 것이라고 생각된다.

외부화염의 당량비가 0.8일 때는 과농화염의 위치에 희박화염이 형성되고 내부 희박화염의 희박한계 특성이 다르게 나타났다. 저속 영역( $u_{lean}=0.25$  m/s 이하)에서는 화염이 없는 경우와 별 차이가 없으나, 유동속도가 빨라지면( $u_{lean}=0.25$  m/s 이상) 외부의 희박화염이 내부 희박화염의 안정화에 기여하는 것을 알 수 있다. 외부화염이 과농화염이 되면 내부의 희박화염은 당량비 증가에 따라 더욱 안정된 특성을 보이기 시작한다. 그러나 외부화염의 당량비가 1.3 이상이 되면 외부화염의 영향은 크게 달라지지 않았다. 즉 외부화염이 과농화염인지 희박화염인지에 따라 민감하지만 같은 과농화염이면 내부 희박화염에 주는 영향이 크게 다르지 않았다. 모든 경우에 희박화염의 유속이 증가하면 희박한계가 한 점으로 수렴하는 경향을 보이는데 이는 과농화염이 희박화

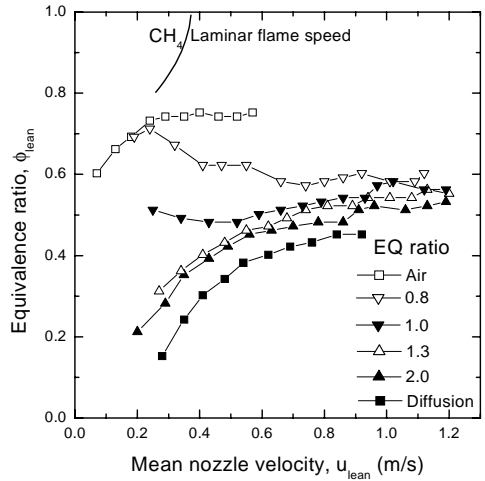


Fig. 4 Lean limits of fuel-lean flames with various equivalence ratios of outer flame

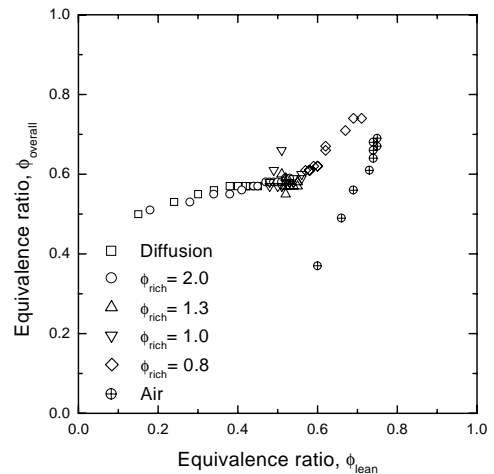


Fig. 5 Overall equivalence ratios at the lean limit of fuel-lean flames with various equivalence ratios of outer flame

염에 주는 상대적 영향이 점차 줄어들고 재순환과 같은 유동장 영향이 점차로 강해지기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5는 내부와 외부화염을 모두 고려한 전체(overall)당량비와 희박한계 당량비의 관계를 나타낸다. 희박-희박화염에 비하여 과농-희박화염은 전체 당량비를 낮게 유지하면서도 안정된 연소가 가능하였다. 대부분의 과농-희박연소 과정에서는 전체 당량비 0.6 이하의 조건에서 안정된 연소가 가능

함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 과농화염의 연료가 메탄과 프로판인 경우에 대한 메탄 희박 예혼합화염의 화염 안정성을 비교하고 있다. 이때 프로판의 체적유량은 98 sccm으로 설정하여 메탄 체적유량 250 sccm 과 동일한 열방출률(저위발열량 기준)을 갖도록 하였다. 과농화염의 열방출률이 같은 조건에서는 연료를 메탄에서 프로판으로 변화하여도 메탄 희박 예혼합화염의 희박한계 당량비는 다르지 않음을 알 수 있었다.

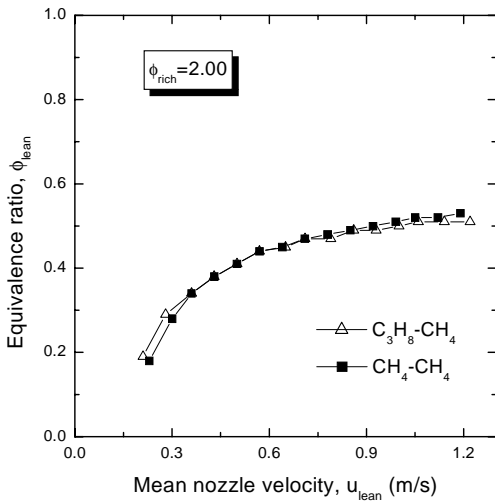


Fig. 6 Lean limit of fuel-lean flames with fuel-rich flames of propane and methane

Fig. 7은 당량비가 2.0일 때 메탄(CH<sub>4</sub>), 에틸렌(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 및 프로판(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 희박화염의 안정화 특성을 보여준다. 메탄 연료유량은 슬롯 당 250 sccm 이고 에틸렌과 프로판은 저위발열량 기준으로 메탄과 동일한 열 방출률을 갖도록 151 sccm, 98 sccm 으로 각각 설정했다. 희박한계 당량비는 에틸렌, 프로판, 메탄 순으로 나타났다. 이는 층류 화염 전파속도 순서와 동일하였으며(당량비 1.0에서 에틸렌 0.67, 프로판 0.44, 메탄 0.40 m/s), 희박한계 당량비는 화염 전파속도와 밀접한 관계가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 서로 다른 당량비에 대하여 과농화염의 연료유량을 100 에서 350 sccm 까지 변화시키면서 희박한계 당량비를 알아본 것이다. 여기서 희박화염의 연료유량은 모두 200 sccm 으로 희박화염의 출

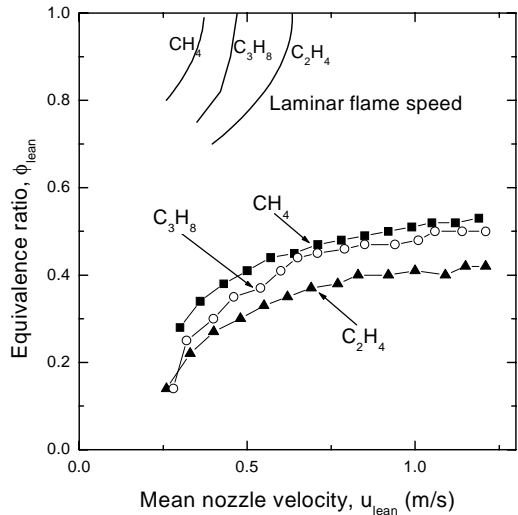


Fig. 7 Lean limit of methane, ethylene and propane fuel-lean flames

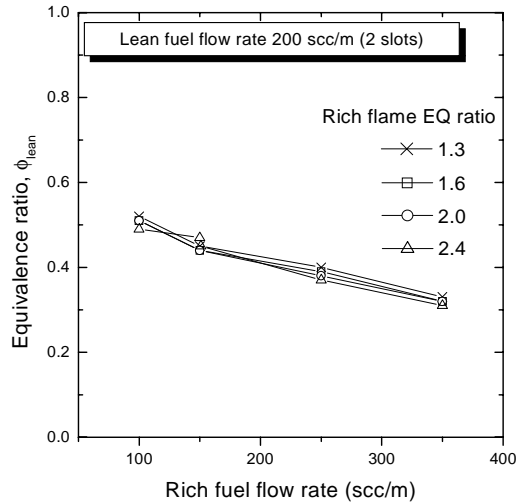


Fig. 8 Lean limit for various rich fuel flow rates

구 평균속도가 0.4 m/s 부근인 저속영역이다. 과농화염의 연료유량이 증가하면 희박한계 당량비가 줄어들었으며, 또한 당량비가 서로 다르더라도 그 차이는 상당히 미약하였다. 이 결과로부터 희박화염을 안정화시키는 과농화염의 특성은 당량비의 변화보다 연료유량, 즉 열방출률의 변화에 더욱 민감하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 과농화염의 당량비를 1.6으로 고정하고 연료유량을 증가시키면서 희박한계 당량비의 변화

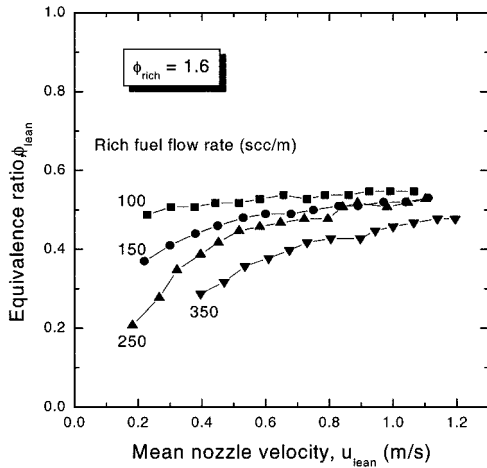


Fig. 9 Effect of fuel flow rate of fuel-rich flames

를 보여주고 있다. 과농화염의 연료유량의 증가에 따라 희박한계 당량비가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이런 경향은 희박화염을 형성하는 혼합기의 속도가 작을수록 뚜렷하게 나타났다. 이는 과농화염의 연료유량의 증가에 따라 과농화염의 열 방출률이 증가하기 때문이라고 이해된다. 그러나 희박화염의 노즐 출구 속도가 증가하면 과농화염의 연료유량에 차이 없이 희박한계 당량비가 0.5와 0.6 사이에서 수렴되어 가는 경향을 보여준다.

Fig. 10은 희박화염의 연료유량이 200 sccm으로 일정하게 유지하는 조건에서, 과농화염의 연료유량 별로 당량비 변화에 대하여 희박한계 당량비의 변화를 나타낸 것이다. 과농화염의 연료유량을 슬롯당 100에서 350 sccm으로 증가 시키면 희박한계 당량비는 과농화염의 연료유량의 증가에 따라 크게 낮아졌다. 그러나 연료유량이 일정한 조건에서는 과농화염의 당량비를 1.3에서 2.4까지 변화를 시켜도 희박한계 당량비의 변화는 매우 적었다. 이 결과는 희박화염의 안정화 특성에 미치는 중요인자는 과농화염의 열 방출률이며 당량비의 영향은 매우 적다는 것을 보여준다.

연료유량을 일정하게 유지하면서 외부화염을 희박화염으로 변화시켜도 안정된 희박화염을 내부에 형성할 수 있었다. 이때 외부화염의 당량비가 1.0 이하로 줄어들면 과농-희박 화염은 희박-희박 화염으로 변하게 된다. 이 경우 내부에 형성된 희박화염의

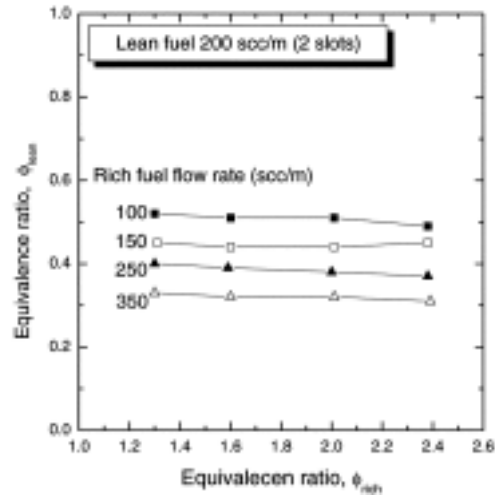


Fig. 10 Effect of equivalent ratio in fuel-rich flames

형상은 거의 변화하지 않지만 외부화염(과농화염 위치에 형성된 희박화염)의 형태는 계속해서 변하였다. 또한 화염 전체의 안정성도 크게 떨어져서 0.9부터는 화염이 부상되고 유속의 변화, 외부 교란 등 작은 변화에도 민감하게 반응하여 화염이 쉽게 날아가게(blow-off) 된다. 따라서 이 연구에서 실험된 슬롯버너에서는 희박-희박 화염의 형성이 가능하지만 안정된 화염은 얻을 수 없었다.

### 3.2 과농-희박 화염의 안정화 메커니즘

Photo. 3은 과농화염에 의해 안정화된 희박 화염과, 희박화염에 의해 안정화된 희박화염의 모습을 보여주고 있다. 과농-희박 예혼합화염은 기본적으로 삼중화염 구조를 갖고 있다. 따라서 과농-희박 예혼합화염의 안정성은 삼중화염의 특성과 연관지어 해석할 수 있다. 삼중화염(tribranchical flame)은 화염이 당량비 1.0인 지역에서 고정(anchor)되고, 과농화염에서 발생한 미연가스 및 화학종 확산에 의하여 확산화염지역(non premixed reaction zone)이 존재하고 여기서 발생한 열량과 라디칼에 의해 희박화염이 안정화된다고 알려져 있다.<sup>6-8)</sup>

Fig. 11은 과농-희박화염과 희박-희박화염에서 얻어진 라디칼 이미지의 대표적인 예로 C<sub>2</sub> 자발광 신호를 보여주고 있다. C<sub>2</sub> 라디칼은 연료 과농 지역에 많이 분포하며 고온의 반응지역에서 생성되고

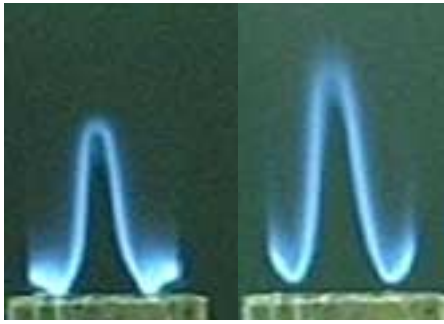


Photo. 3 Rich-lean flame and lean-lean flame

소멸하며 화학반응을 촉진하기 때문에 라디칼이 많다는 것은 연소 반응이 활발하게 진행된다는 것을 의미한다. 과농-희박화염의 경우 희박-희박화염에 비해서 외부 화염과 내부 화염 사이에서  $C_2$  자발광이 더 강하게 나타났으며, 이는 과농화염에서 발생한 가연성 중간생성물 또는 라디칼이 희박화염으로 확산되며 반응하기 때문이라고 생각된다.

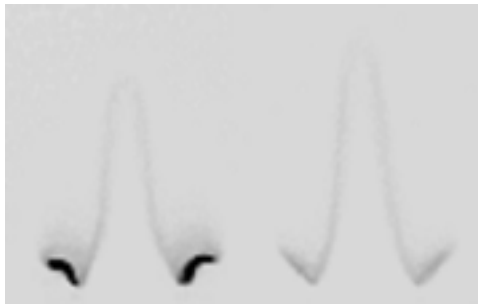


Fig. 11  $C_2$  spontaneous emission images for rich-lean flame and lean-lean flame

라디칼 자발광 이미지를 분석한 결과 과농-희박화염의 구조는 삼중화염과 매우 흡사하였다. 강한  $C_2$ 와  $CH$  라디칼 자발광 이미지가 과농화염 위치에 존재하고 또한 희박화염과 과농화염의 사이에서도 라디칼이 분포하였다. 반면에  $OH$  라디칼 자발광 이미지는 과농화염과 희박화염이 만나는 점을 중심으로 양쪽으로 강하게 나타났다. 이는 과농-희박화염의 안정화 메커니즘과 삼중점이 희박화염을 붙잡아(anchor)주는 역할을 하는 삼중화염의 메커니즘이 유사하다는 것을 의미한다. 그러나 희박-희박화염의 라디칼 자발광 이미지에서는 삼중점의 역할을

하는 지역과 확산반응이 진행되는 지역이 관찰되지 않았다. 따라서 희박-희박화염의 경우 화염의 형태는 과농-희박화염과 유사하지만, 화염의 안정화 메커니즘은 다르다고 생각된다.

Fig. 12는 삼중화염의 개념으로 과농-희박화염과 희박-희박화염을 비교하였다. 과농-희박화염의 경우 과농화염에서 발생한 라디칼과 가연성 중간생성물(주로  $CO$  또는 미연탄화수소)들이 희박화염 방향으로 확산되어 확산연소 반응지역을 형성하거나 또는 직접적으로 희박화염의 생성을 도와 화염을 안정화시킬 수 있다고 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 반면에 희박-희박화염의 경우 외부와 내부에 모두 희박화염이 형성되므로 중간생성물 또는 라디칼 확산에 의한 희박화염의 안정화 효과를 크게 기대할 수 없다.

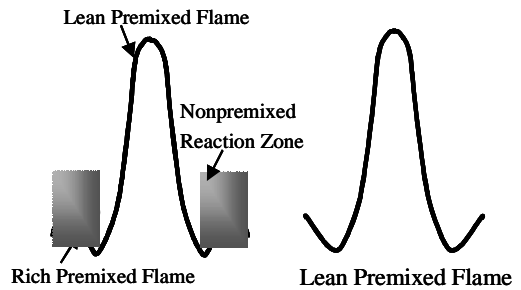


Fig. 12 The structure of rich-lean flame and lean-lean flame

#### 4. 결론

안정적인 희박연소를 실현하기 위한 기초연구로서 과농-희박 메탄 예혼합화염의 안정화 특성을 알아보았다. 슬롯버너를 통하여 수행된 이 연구를 통하여 다음을 알 수 있었다.

- 1) 희박화염에 인접하여 생성된 과농화염으로 희박화염의 안정성은 크게 향상될 수 있다.
- 2) 희박혼합기의 유속이 작을수록 희박한계 당량비는 낮아진다. 반면에 유속이 커지면 일정한 값으로 수렴하게 되는데, 이는 과농화염이 희박화염의 안정화에 미치는 기여도가 줄어들기 때문이라고 생각된다. 따라서 실용 연소기에서는 부하범위에 따른 연료유량의 조절이 필요하다.
- 3) 과농-희박화염의 총괄 당량비는 0.6 이하로 유지가 가능하며 희박한계 당량비가 과농화염의 당

량비 변화에 민감하지 않았다. 실용적인 희박연소기에 적용되는 과농화염의 당량비는 1.3~1.6 정도가 적절하였다.

- 4) 과농-희박화염의 안정화 특성은 프로판과 에틸렌에서도 같은 경향으로 관찰되었다. 동일한 열량을 기준으로 희박한계 당량비는 에틸렌, 프로판, 메탄 순으로 화염전파속도가 빠를수록 희박한계 당량비가 낮게 나타났다. 따라서 화염 전파속도를 향상시킬 수 있다면 안정화 범위도 증가시킬 수 있으리라 기대된다.
- 5) 희박화염의 안정화 메커니즘은 삼중화염의 특성으로 해석될 수 있었다. 이때 희박화염의 안정화는 과농화염의 당량비보다 열 방출률에 더욱 민감하였다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 단국대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- 1) C. T. Bowman, "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation," Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp.859-878, 1992.
- 2) S. Ghosal and L. Vervisch, "Stability Diagram for Lift-Off and Blow out of a Round Jet Laminar Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol.123, pp.646-655, 2001.
- 3) F.-Q. Zhao, M.-C. Lai and D. L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines," SAE 970627, 1997.
- 4) D. C. Arters, E. A. Bardasz, E. A. Schiferl and D. W. Fisher, "A Comparison of Gasoline Direct Injection and Port Fuel Injection Vehicles; Part I-Fuel System Deposits and Vehicle Performance," SAE 1999-01-1498, 1999.
- 5) M. S. Hong and K. S. Kim, "A Study on Direct Injection Stratified Charge Combustion with Spark Ignition in Constant Volume Bomb," *Transactions of KSAE*, Vol.2, No.5, pp.30-40, 1994.
- 6) X. Xiao, C. W. Choi and I. K. Puri, "Temperature Measurements in Steady Two-Dimensional Partially Premixed Flames Using Laser Interferometric Holography," *Combustion and Flame*, Vol.120, pp.318-332, 2000.
- 7) R. Azzoni, S. Ratti, S. K. Aggarwal and I. K. Puri, "The Structure of Triple Flames Stabilized on a Slot Burner," *Combustion and Flame*, Vol.119, pp.23-40, 1999.
- 8) I. K. Puri, S. K. Aggarwal, S. Ratti, and R. Azzoni, "On the Similitude Between Lifted and Burner-Stabilized Triple Flames: A Numerical and Experimental Investigation," *Combustion and Flame*, Vol.124, pp.311-325, 2001.