

# H<sub>2</sub>/CO 합성가스 비예혼합 난류 제트화염에서 부착화염의 화염안정화

황정재\* · Nicolas Bouvet\*\* · 손기태\* · 윤영빈\*\*\*

## Stability of Attached Flame in H<sub>2</sub>/CO Syngas Non-premixed Turbulent Jet Flame

Jeongjae Hwang, Nicolas Bouvet, Kitae Sohn and Youngbin Yoon

### ABSTRACT

The detachment stability characteristics of syngas H<sub>2</sub>/CO jet attached flames were studied. The flame stability was observed while varying the syngas fuel composition, coaxial nozzle diameter and fuel nozzle rim thickness. The detachment stability limit of the syngas single jet flame was found to decrease with increasing mole fraction of carbon monoxide in the fuel. In hydrogen jet flames with coaxial air, the flame detachment stability was found to be independent of the coaxial nozzle diameter. However, velocities of appearance of liftoff and blowout velocities of lifted flames have dependence. At lower fuel velocity range, the critical coaxial air velocity leading to flame detachment increases with increasing fuel jet velocity, whereas at higher fuel velocity range, it decreases. This increasing-decreasing non-monotonic trend appears for all H<sub>2</sub>/CO syngas compositions (50/50~100/0% H<sub>2</sub>/CO). To qualitatively understand the flame behavior near the nozzle rim, OH\* chemiluminescence imaging was performed near the detachment limit conditions. For all fuel compositions, local extinction on the rim is observed at lower fuel velocities(increasing stability region), while local flame extinction downstream of the rim is observed at higher fuel velocities(decreasing stability region). Maximum values of the non-monotonic trends appear to be identical when the fuel jet velocity is normalized by the critical fuel velocity obtained in the single jet cases.

**Key Words** : Turbulent jet flame, Detachment, Attached flame, Stability, Syngas flame

### 1. 서론

최근 신재생 에너지에 대한 필요성이 점차 대두되면서 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)에 대한 관심이 높아지고 있다. IGCC 발전소는 석탄을 가스화한 연료를 가스터빈 발전을 통해 전력생산을 하게 되는데, 이 석탄가스화 합성가스는 주로 H<sub>2</sub>와 CO로 이루어져 있다[1]. 이러한 H<sub>2</sub>와 CO의 합성가스의 연소특성은 기존 가스터빈 발전에서 사용되고 있는 LNG의 연소특성과 차이가 있기 때문에 합성가스 연소특성에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔다[2,3]. 특히 H<sub>2</sub>는 화염전파속도가 아주 빨라 역화의 우려가 존재하므로 예혼합 화염 방식의 경우 위험성이 따른다. 따라서 높은 H<sub>2</sub> 함유량의 연료를 사용하는 IGCC

플랜트 연소기는 대부분 비예혼합 혹은 확산화염 방식의 적용이 고려되고 있다.

난류 제트 확산화염의 화염 안정성에 대한 많은 연구들이 진행되어져 왔는데, 특히 림-안정화 화염[4-11]과 부상화염[12-15]에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다. 단일제트의 림-안정화 화염에 대한 연구는 비교적 많이 이루어져 왔지만 실제 연소기에서 사용되는 동축공기 조건에서의 림-안정화 화염에 대한 연구는 비교적 적게 이루어져 왔다. 동축공기는 반응에 필요한 공기를 원활히 공급해줌으로써 화염길이를 짧게 하여 NOx 저감에 유리하다는 장점이 있지만[16], 공기의 출구속도가 높아질수록 화염안정성에는 불리한 영향을 미치게 된다. Takahashi 등[5]은 수소 단일 제트화염에서의 화염안정성 연구를 수행하였는데 화염 밑단에서의 화염속도와 유입 유동속도의 국소적인 균형에 기초한 안정성 모델을 제시하였다. Vranos 등[4]과 Takahashi 등[7]은 동축공기 조건에서의 수소

\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락저자, ybyoon@snu.ac.kr

제트화염의 안정성을 연구하였다. 또한 Takahashi 등 [6]은 메탄-동축류 화염에서 화염 부상(혹은 detachment)의 메커니즘에 대한 연구를 수행하였다. 세 가지 타입의 부상 criteria를 제시하였고 다음과 같다.

- (1) 화염 밑단의 안정성에 의한 부상: 화염 밑단에서 국소층류화염속도와 유입유동의 속도가 균형을 이루지 못함
- (2) 국소 소염에 의한 부상: 전단층에 의해 생겨난 제트의 large-vortex에 의한 국소 소염
- (3) 희박 한계 소염에 의한 부상: 두꺼운 림에 생성된 와류에 안정화된 화염 밑단이 희박 한계에 의해 소염

타입 (1)은 비교적 얇은 두께의 림 조건( $l=0.2, 1.2$  mm)에서 관찰된 반면 타입 (2)와 (3)은 두꺼운 림 조건( $l=2.4$  mm)에서 관찰되었다. 이러한 제트화염의 detachment 안정성에 대한 연구는 탄화수소계열과 수소 연료에 대해 많이 진행되어왔지만 합성가스(syngas)에 대해서는 전혀 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 합성가스를 연료로 하는 림-안정화 제트화염에서 합성가스의 조성과 동축공기의 조건에 따른 detachment 안정성 연구를 수행하였다. 동축공기 조건에 앞서 단일연료제트에서의 연료 조성에 따른 안정화 연구를 수행하였다. 동축공기의 직경과 림 두께의 효과를 보기 위해 수소제트화염에 동축공기 노즐의 직경과 연료노즐의 림 두께를 바꾸어가며 안정화 실험을 수행하였다. 마지막으로 동축공기 조건에서 H<sub>2</sub>/CO 합성가스 제트화염의 화염안정화 특성을 파악하였다. 화염 안정화 한계 영역에서 화염의 detachment 메커니즘을 정성적으로 파악하기 위해 OH\*

자발광 측정을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 연소실, 유량 조절부, 가시화장치 등으로 구성되어 있다. 연소실은 200 × 200 × 800 mm의 직육면체 형태이고 가시화를 위해 네 면에 퀴츠창을 장착하였다. 연료 노즐이 연소실의 바닥면 중앙에 위치하고 동축공기의 노즐이 연료 노즐을 감싸고 있다. 연료 노즐은 Stainless steel로 만들어졌고 내경( $d$ )은 3 mm이며 림 두께( $l$ )는 0.45, 0.90 mm의 두 종류이다. 동축공기 노즐은 Brass 재질로 만들어졌고 내경( $d_a$ )은 10.1, 12.4, 15.0 mm의 세 종류이다. 동축공기 노즐의 수축부는 노즐 출구에서의 유동의 균일한 분포를 위해 Stockes-Beltrami streamline equation[17]을 바탕으로 설계하였다. 주위류(Coflow air)는 유리구슬과 허니컴을 지나 연료와 동축공기 노즐 주위로 공급되었는데 이는 연소실 내의 글로벌 당량비를 희박조건으로 유지하기 위함이었다. 주위류의 평균 속도는 0.2 m/s 이하로 반응이 일어나는 영역의 유동장에 거의 영향을 미치지 않았다.

연료로 사용된 H<sub>2</sub>(순도 99.95%)와 CO(순도 99.95%)는 각각 MFC(Mass Flow Controller)의 제어를 통해 공급하였고 두 연료 혼합의 증대를 위해 3 mm 직경의 유리구슬로 가득찬 혼합챔버를 거쳐서 공급하였다. 동축공기는 압축기로 압축된 공기를 공급하였고 MFC를 통하여 제어하였다.

모든 실험은 최소 2번 수행하여 재현성을 확보하였고 연료의 속도가 고정된 상태에서 blowoff 혹은 liftoff가 일어날 때까지 동축공기의 속도를 천천히 높

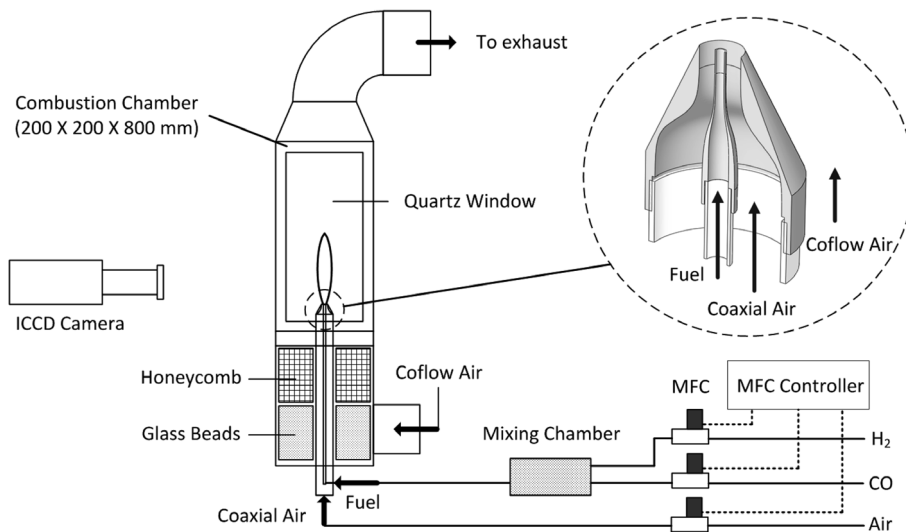


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus and nozzle geometry.

여가며 수행하였다. 연료와 동축공기는 모두 난류의 조건에서 분사되었는데 각각의 레이놀즈수는 모두 3,500 이상의 조건이었다. 연료의 레이놀즈 수는  $Re_f = (U_f \cdot d_f) / \nu_f$ 로 정의되는데 여기서  $U_f$ 는 연료의 출구속도,  $\nu_f$ 는 연료의 동점성 계수이다. 동축공기의 레이놀즈 수는  $Re_a = [U_a \cdot \{d_a - (d_f + 2l)\}] / 2\nu_a$ 로 정의되는데 여기서  $U_a$ 는 동축공기의 출구속도,  $\nu_a$ 는 공기의 동점성 계수이다. 각 조성에서의 동점성 계수는 상용 코드인 CHEMKIN의 물성치 계산을 이용하여 획득하였다. 합성가스의 조성은 단일제트의 경우 20/80~100/0% H<sub>2</sub>/CO 범위에서, 동축공기 조건 제트에서는 50/50~100/0% H<sub>2</sub>/CO 조건에서 수행하였다. 50% 이하의 H<sub>2</sub> 조건에서는 대부분 동축공기가 층류인 조건에서 Blowoff가 일어났다.

화염 detachment 한계의 부근에서 화염의 거동을 관찰하기 위해서 화염의 부착영역 부근에서 OH\* 자발광 측정을 하였다. 화염의 자발광 측정은 ICCD 카메라(512 × 512 pixel, PI-MAX, Princeton Instruments Inc.)를 이용하였고 UV-Nikkor(f = 105 mm; f/4.5)의 렌즈에 필터(WG-305, UG-11)와 2 × teleconverter를 장착하여 측정하였다. 노출시간은 100 msec이었고 10장의 이미지를 평균하였다. 촬영의 타겟은 노즐 부근의 12.1 × 12.1 mm 영역이다.

### 3. 결과 및 논의

#### 3.1. H<sub>2</sub>/CO 단일제트화염의 안정화 특성

Fig. 2(a)는 동축공기가 없는 단일제트화염에서 합성가스 연료의 H<sub>2</sub>의 몰분율에 따른 화염의 detachment가 일어나는 연료속도( $U_{fc}$ )를 나타낸다. 그림에는 N<sub>2</sub>/He/Ar을 희석한 H<sub>2</sub>에 대한 Takahashi 등[5]의 실험결과도 함께 나타나있다. He이 희석된 H<sub>2</sub>의 경우만 제외하고 H<sub>2</sub>의 몰분율 증가에 따라 유사한 경향을 보이는데 H<sub>2</sub>의 몰분율이 약 0.9까지는 선형적으로 증가하다가 0.9~1.0 범위에서는 아주 급격하게 증가하는 현상이 나타난다. He이 희석된 H<sub>2</sub>의 경우는 전 구간에서 선형적인 증가가 나타난다. Takahashi 등[5]은 노즐 부착화염의 화염안정화 모델을 제시하였다. 노즐과 화염의 밀단 사이의 작은 공간에서 연료와 산화제의 예혼합이 상호 확산에 의해서 일어나고, 이 혼합기가 가연한계 내에 있는 구간에서 층류 예혼합 화염이 형성된다. 이 화염의 전파속도와 유입되는 유동속도와의 균형이 화염의 detachment을 지배한다는 것이 위 모델의 기본 배경이다. 그러므로 연료/산화제 혼합기의 예혼합화염의 화염속도는  $U_{fc}$ 에 영향을 미치는 중요한 파라미터로 볼 수 있다. Fig. 2(b)에 각 연료조건과 주위기체(ambient gas)의 혼합기에 대한 층류화염속도의 최대값,  $S_{u,max}$ 가 나타나 있다. 이 값

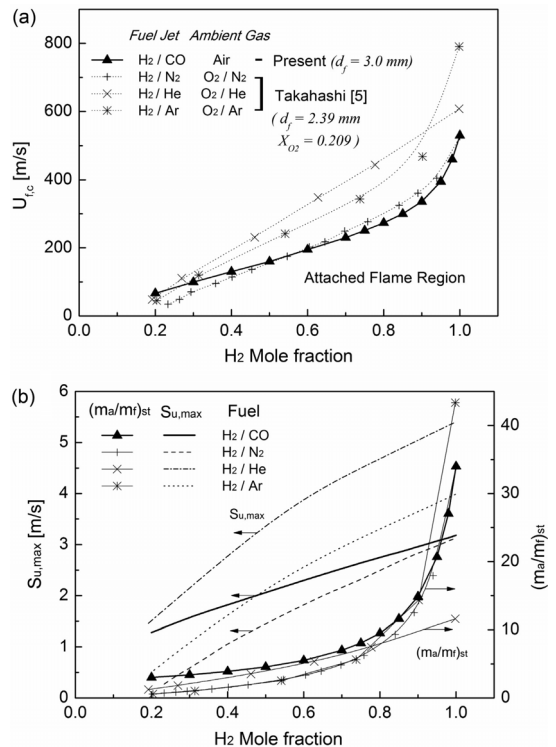


Fig. 2. (a) The critical flame jet velocity at the stability limit of simple jet flame ( $U_{fc}$ ). (b) The maximum laminar flame speed of mixture ( $S_{u,max}$ ) and mass ratio of air(or ambient gas) to fuel at the stoichiometric condition,  $(m_a/m)_{st}$ .

들은 이전 연구들[2,5]에서 인용되었다. 그래프에 따르면 H<sub>2</sub> 몰분율의 증가에 따라  $U_{fc}$ 와  $S_{u,max}$ 가 모두 증가한다는 것은 알 수 있지만 그것들의 증가 경향은 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, He 경우만 제외하고,  $U_{fc}$ 는 H<sub>2</sub> 몰분율 0.9 이하에서 선형적으로 증가하고 0.9 이상에서는 급격히 증가하는데 반해  $S_{u,max}$ 는 H<sub>2</sub> 몰분율 증가에 따라 증가율이 약간 감소하지만 거의 모든 구간에서 선형적으로 증가한다고 볼 수 있다. 따라서  $U_{fc}$ 는  $S_{u,max}$  외에 또 다른 주요 파라미터에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 본 연구를 수행하는 과정에서 동일 연료출구속도임에도 불구하고 화염 밀단의 위치가 연료에 따라 크게 차이를 관찰할 수 있었다. H<sub>2</sub>의 몰분율이 높을수록 노즐과 좀 더 떨어진 공기 쪽에, H<sub>2</sub>의 몰분율이 낮을수록 노즐과 가까운 연료 쪽에 화염이 밀단이 형성되었다. 이러한 관찰을 통해 stoichiometric 조건에서의 공기-연료 질량비 ( $(m_a/m)_{st}$ )가  $U_{fc}$ 에 영향을 미치는 중요 파라미터라는 것을 알 수 있다.  $(m_a/m)_{st}$ 가 큰 연료일 경우 stoichiometric 조건을 형성하기 위한 공기가 상대적으로 많이 필요하므로 노즐에서 상대적으로 떨어진 공기 쪽에 화염의 밀단이 형성되고 반대의 경우는 연료에 가

까운 쪽에 형성이 된다. 노즐에서 멀어질수록 그곳의 유동속도는 연료제트속도에 대해 큰 비율로 작아지기 때문에  $(m_a/m_f)_{st}$ 가 큰 연료일수록 좀 더 높은 연료제트속도까지 화염이 유동의 속도와 균형을 이룰 수 있다. Fig. 2(b)에 각 연료에 대해 H<sub>2</sub> 몰분율에 따른  $(m_a/m_f)_{st}$ 가 나타나있다. He의 경우만 제외하고 모든 연료에 대해 높은 H<sub>2</sub> 몰분율에서 급격한 증가를 보이는데 이러한  $(m_a/m_f)_{st}$ 의 경향은  $U_{fc}$ 의 경향에 큰 영향을 미친 것으로 보인다. He의 경우 전 구간에서 선형적으로 증가하는데 이 또한  $(m_a/m_f)_{st}$ 의 경향과 일치한다. 즉,  $U_{fc}$ 는  $S_{u,max}$ 와  $(m_a/m_f)_{st}$  모두에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

### 3.2. 수소 제트화염에서 노즐 형상의 영향

#### 3.2.1. 동축공기 노즐의 영향

Fig. 3(a)는 동축공기가 있는 수소 제트화염의 화염안정화 특성을 나타낸다. 화염의 안정화 특성에 따라 다음과 같이 몇 부분으로 나누어진다. 화염이 노즐 부근에서 안정화되는 노즐부착화염영역(attached flame region), 화염이 노즐 출구로부터 어느 정도 떨어진 후류에서 안정화되는 부상화염영역(lifted flame region), 부착화염이 꺼지거나 부상화염이 날리는 화염꺼짐/날림영역(blowoff/blowout region)으로 나눌 수 있다. 단일제트의 부착화염에서 동축공기를 증가시키면 공급되는 동축공기가 공기/연료의 혼합을 증대시켜 화염길이 및 크기를 축소시킨다. 동축공기를 더욱 증가시키면 화염은 부상되거나 꺼지게 된다. 즉, 동축공기의 존재는  $U_{fc}$ 보다 작은 연료속도에서도 화염의 꺼짐, 부상 등을 야기할 수 있다. 본 연구에서는 화염의 detachment 메커니즘을 다루고 있는데 detachment 현상은 결국 두 결과로 이어진다. 그 중 하나는 화염의 부상(liftoff)으로서 노즐 부근의 화염안정화가 깨어지고 난 후 노즐 후류에서 다시 화염이 안정될 수 있는 조건이 형성되는 경우이다. 나머지는 화염의 꺼짐(blowoff)으로서 깨어진 노즐 부근의 화염안정화가 후류에서 다시 안정화될 조건이 형성되지 않는 경우로 화염은 꺼져버린다.

Fig. 3(a)에 동축공기 노즐 직경에 따른 화염안정화의 특성이 나타나있다. 그래프에 따르면 화염의 안정화 특성은 동축공기 노즐의 크기에 거의 영향을 받지 않는다. 이 결과는 이전 연구자의 결과[7]와 상이하다고 볼 수 있는데 이 연구에서는 동축공기 노즐의 크기에 따라 안정화 특성이 조금 다르게 나타나는 것은 경계층의 두께 변화에 따른 속도 구배 차이의 영향이라고 보고하였다. 이전 연구의 결과와 본 연구의 결과의 차이는 동축공기 노즐의 수축부 설계에 기인하는 것으로 파악되었다. 본 연구의 노즐은 수축부에서 출구까지 직선으로 설계된 것에 반해 이전 연구에

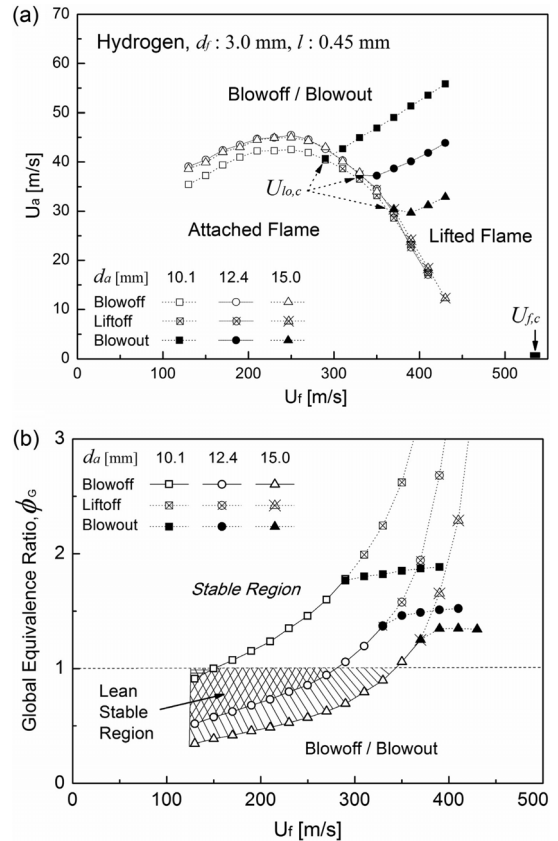


Fig. 3. (a) Stability limits of pure hydrogen turbulent jet flame with coaxial air ( $d_f = 3.0$  mm,  $l = 0.45$  mm, and  $d_a = 10.1, 12.4,$  and  $15.0$  mm). (b) Equivalence ratio at stability limits corresponding to (a).

서는 직선 유로 없이 수축부에서 바로 출구로 연결되도록 설계되었다. 그렇지만 두 연구를 통해 얻은 유사한 결론은 화염의 안정성은 노즐의 직경에 따른 유량 등의 영향이 아닌 노즐 출구(혹은 화염 안정화 지점에 형성되는 유동)의 속도 혹은 속도 구배에 영향을 받는다는 것이다.

화염의 꺼짐이 아닌 부상화염의 나타나기 시작하는 연료속도(Fig. 3(a)에서  $U_{lo,c}$ )는 동축공기의 직경에 따라 다르게 나타난다. 10.1, 12.4, 15.0 mm 직경의 노즐에 대해 각각 280, 310, 170 m/s에서 부상화염이 나타나기 시작하였다. 부상화염의 날림(blowout)이 일어나는 구간도 동축공기 노즐의 직경에 따라 다르게 나타나는데 이러한 특성들은 부상화염의 안정화가 노즐 후류의 난류의 특성에 의해 영향을 받고 이러한 난류의 특성은 동축공기의 노즐 직경에 따라 다르기 때문이다.

Fig. 3(b)는 3(a)의 안정화 특성을 전체 당량비(global equivalence ratio)로 표현한 그래프이다. 실제 연소기에서는 주위류가 없으므로 detachment 안정화 특성

에 영향을 미치지 않는 주위류를 배제하고 연료제트와 동축공기만을 고려하였다. 일반적으로 연소기는 희박조건에서 운용되는데 희박조건이면서 안정한 화염이 형성되는 구간이 빗금으로 표시되어 있다. 본 연구에서 사용된 동축공기 노즐 중 가장 운용범위가 넓은 노즐은 15.0 mm 노즐이다. 반면에 가장 작은 10.1 mm 노즐은 거의 모든 안정화 구간이 전체 당량비가 과농한 구간임을 알 수 있다. 즉, 동축공기 노즐의 직경은 안정화에 크게 영향을 미치지 않지만 운용 조건 등을 잘 고려하여 설계를 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

### 3.2.2. 연료노즐 림 두께의 영향

Fig. 4는 노즐의 림 두께( $l$ )에 따른 수소제트화염의 안정성을 나타낸다. Vranos 등[4]과 Takahashi 등[7]의 결과도 함께 나타나 있다. 본 연구의 결과가 Vranos 등[4]의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 전체적으로 볼 때 노즐의 림 두께는 화염의 detachment 안정성에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 비교적 큰 노즐 림 두께의 경우(Vranos 결과[4]에서 0.39, 0.71 mm, 본 연구에서 0.45, 0.90 mm) 화염의 안정성은 비교적 낮은 연료속도에서 증가하였다가 높은 연료속도에서 감소하는 비단조의 경향을 나타낸다. 노즐 림의 두께가 두꺼워질수록 노즐 림 후류의 wake에 형성되는 재순환영역에 더 많은 연료가 유입될 것으로 생각된다. 그러므로 이 영역에서 안정된 화염을 희박한계 소멸(lean extinction)에 이르게 하기 위해서는 더 많은 공기의 유입이 필요하기 때문에 결과적으로 더 높은 동축공기의 속도조건에서도 화염이 유지될 수 있다. 단일 림 두께 조건에서 연료속도에 따른 안정성의 증가 경향성도 유사한 설명이 가능하다.

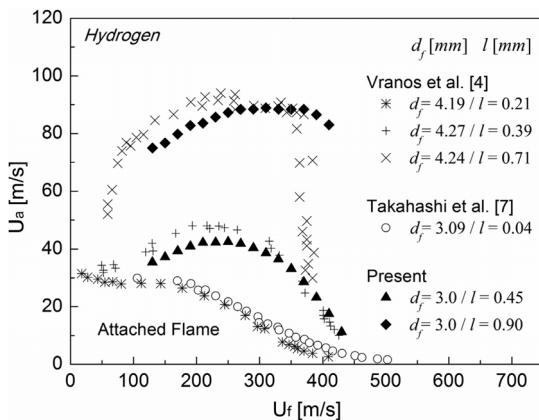


Fig. 4. Detachment stability limits of hydrogen jet flame with coaxial air for various rim-thickness of fuel nozzle.

연료속도가 높을수록 림의 wake에 유입되는 연료의 양이 많아지므로 화염의 희박한계 소멸도 더 높은 동축공기의 속도에서 일어난다.

비교적 얇은 노즐 림의 경우( $l < 0.21$  mm) 화염의 detachment는 상대적으로 작은  $U_a$ 에서 일어나고 연료속도 증가에 따라 감소하기만 하는 단조로운 경향을 나타낸다. 이와 같이 아주 얇은 노즐 림의 경우는 위에서 설명된 wake에서 안정화 된 화염과는 다른 메커니즘에 의해 화염이 안정화됨을 알 수 있다.

### 3.3. 동축공기가 있는 H<sub>2</sub>/CO 제트화염의 안정화 특성

Fig. 5에 림-안정화된 H<sub>2</sub>/CO 합성가스 제트화염의 detachment 안정화 특성이 CO의 함유량(% Vol)에 따라 나타나 있다. 모든 연료의 조성에 대해서 증가-감소의 유사한 비단조 특성이 나타난다. 합성가스 연료의 CO 함유량이 높아짐에 따라 안정화 곡선은 왼쪽으로, 위쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. CO 함유량의 증가에 따른 곡선의 왼쪽 이동은  $S_{u,max}$ 와  $(m_o/m)_{st}$ 의 영향에 따른  $U_{fc}$ 의 감소에 기인하는 것으로 생각된다(Fig. 5의 X 심볼).

화염의 detachment 안정성 한계 부근에서 획득한 OH\* 자발광 이미지가 Fig. 6에 나타나 있다. 노즐 림 부근의 12.1 × 12.1 mm 영역을 촬영하였고, 각 연료 조성(a) 100/0% H<sub>2</sub>/CO, (b) 75/25% H<sub>2</sub>/CO, (c) 50/50% H<sub>2</sub>/CO의 이미지가 각각 네 지점(A-D)에서 획득되었다. A와 B 지점은 안정성 그래프에서 증가하는 경향(상대적으로 낮은  $U_f$ )의 한계 근처에 위치하고 C와 D 지점은 감소하는 경향(상대적으로 높은  $U_f$ )의 한계 근처에 위치한다. 그림에서 볼 수 있듯이 OH\* 자발광의 신호는 약간 비대칭으로 나타나는데 이는

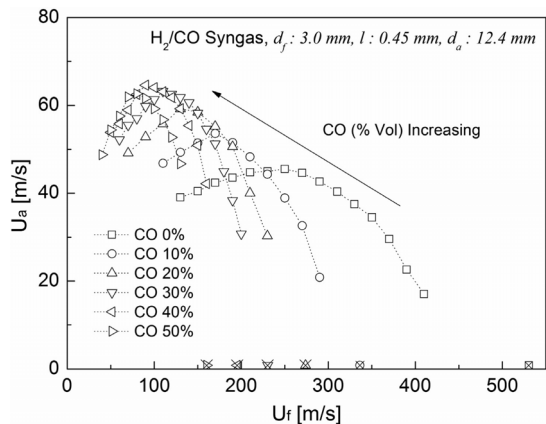
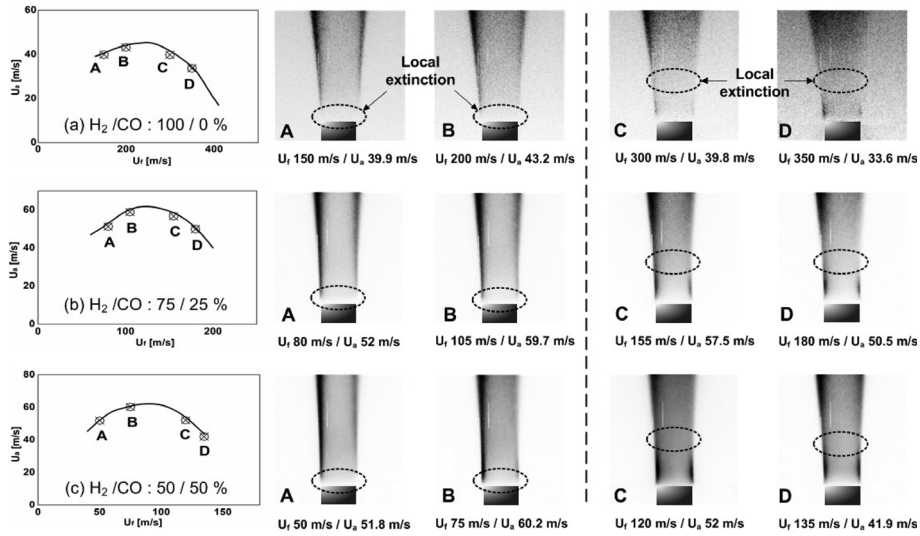


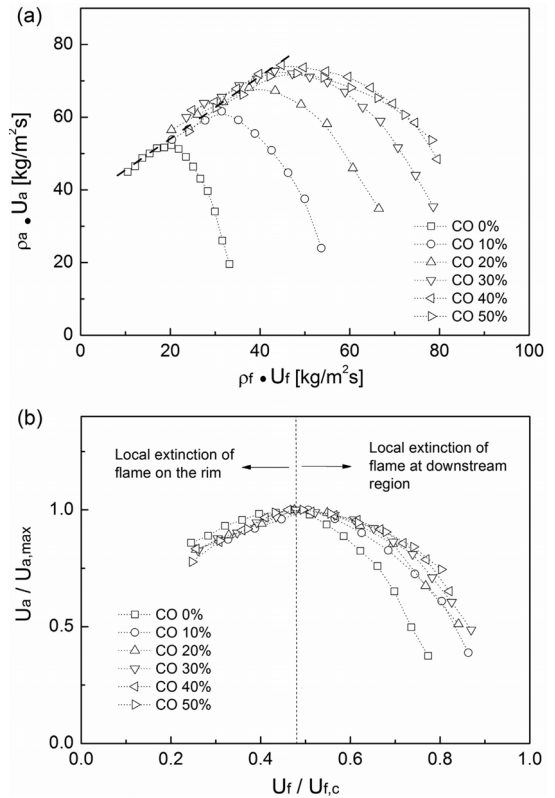
Fig. 5. The detachment stability limits of rim-stabilized syngas H<sub>2</sub>/CO jet flames( $d_f = 3.0$  mm,  $l = 0.45$  mm, and  $d_a = 12.4$  mm); X symbols are the stability limits of simple jet flame.



**Fig. 6.** Averaged OH<sup>+</sup> chemiluminescence images near the nozzle exit of 12.1 x 12.1 mm area ( $d_f = 3.0$  mm,  $l = 0.45$  mm, and  $d_a = 12.4$  mm): (a) H<sub>2</sub>/CO 100/0%, (b) H<sub>2</sub>/CO 75/25%, (c) H<sub>2</sub>/CO 50/50%.

연료노즐과 동축공기 노즐의 중심을 맞추는 과정에서 완벽한 축대칭을 구현하지 못하였기 때문이다. 그럼에도 불구하고 양쪽의 화염면(실제로 실린더 형태의 화염이지만 2D에서 양 끝이라 명시함)에서 동일한 경향을 보인다. 모든 연료의 조성에서 A와 B의 화염 거동과 C와 D의 화염 거동이 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그림의 점선 원에서 알 수 있듯이 A와 B 지점의 경우에는 노즐의 바로 위에서 화염의 국소 소멸이 관찰되고 C와 D 지점에서는 노즐 출구에서 어느 정도 떨어진 후류에서 국소 소멸이 관찰되었다. C와 D 지점의 경우는 국소 소멸이 발생하는 전단의 노즐 림 바로 위의 화염은 여전히 존재함을 확인할 수 있다. 이 결과와 유사한 현상이 Takahashi 등[6,10]이 수행한  $l = 2.4$  mm 노즐에서의 메탄/동축공기 제트화염의 연구에서 보고된 바 있다. 본 연구에서의 안정성 그래프에서 증가하는 영역의 화염 detachment는 Takahashi 등[6]이 위의 연구에서 제안한 메커니즘과 동일하다고 판단된다. 즉, detachment는 노즐 림의 wake에 형성된 화염 밑단(flame base)의 희박 가연한계(lean flammability limit)에 의해 지배받는다. 반면 안정성 그래프에서 감소하는 영역의 화염 detachment는 전단층에 의해 생성된 large vortex에 의해 확산화염 면에 높은 strain이 야기되어 발생하는 국소 소멸에 의해 지배를 받는 것으로 생각된다. 국소 소멸은 노즐에서 어느 정도 떨어진 부분에서 발생하는데 이때 림의 wake에서 형성된 화염은 희박한계에 이르지 않았으므로 그 부분에는 여전히 화염이 관찰된다.

Fig. 7(a)에 화염 안정성의 그래프를 연료와 동축공기의 massflux(연료:  $\rho_f U_f$ , 동축공기:  $\rho_a U_a$ )의 함수



**Fig. 7.** The detachment stability limits of syngas H<sub>2</sub>/CO jet flames ( $d_f = 3.0$  mm,  $l = 0.45$  mm, and  $d_a = 12.4$  mm): (a) Coaxial air massflux as a function of fuel massflux, (b) Coaxial air velocity normalized by maximum limit velocity of coaxial air ( $U_a/U_{a,max}$ ) as a function of fuel jet velocity normalized by critical fuel velocity of simple jet ( $U_f/U_{f,c}$ ).

로 나타내었다. 모든 연료 조성의 증가하는 경향의 영역들이 단일 라인 상에 있음을 알 수 있다. 앞서 논의한 바와 같이 증가하는 영역은 노즐 림 재순환영역의 희박 가연한계에 의해 지배되는 것으로 판단되는데 더 높은 연료제트의 massflux는 더 많은 양의 연료를 노즐 림의 재순환영역으로 유입시키게 되고 따라서 희박 가연한계에 도달하기 위해서는 더 많은 공기의 massflux가 필요하게 되는 것이다. Fig. 7(b)는 detachment 안정성을 동축공기의 속도를 안정화 한계의 동축공기 최대값으로 표준화한 값( $U_d/U_{a,max}$ )과 연료의 속도를 단일제트화염의 안정화 한계속도로 표준화한 값( $U_f/U_{fc}$ )으로 표현한 그래프이다. 모든 곡선이  $U_f/U_{fc} = 0.48$ 까지 증가하다가 이후로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 앞선 Fig. 4에서 알 수 있듯이 노즐 림의 두께는 안정성에 영향을 미치므로 비단조의 곡선의 최대점을 결정한다고 볼 수 있다. 그리고 이전 연구결과[6,10]에서 알 수 있듯이 메탄의 경우에는 증가-감소의 비단조 특성이  $l = 1.2$  mm에서는 나타나지 않고(감소특성만 나타남),  $l = 2.4$  mm에서 나타나는 반면 수소의 경우에는  $l = 0.39$  mm에서부터 나타나기 시작한다. 즉, 비단조의 특성이 나타나는 림의 두께는 연료의 특성에 따른다고 볼 수 있다. 본 연구에서 사용된 합성가스의 모든 범위의 조성(50/50~100/0% H<sub>2</sub>/CO)에서는  $l = 0.45$  mm의 노즐 림 두께에서 증가-감소의 비단조 특성이 모두 나타났고 동일한  $U_f/U_{fc} = 0.48$  지점에서 최대값을 가졌다. 즉, 50/50~100/0% H<sub>2</sub>/CO 합성가스는  $U_f/U_{fc} = 0.48$ 의 최대값을 가지는 비단조의 특성이 동일하게 나타났고 이는 탄화수소계열보다 훨씬 빠른 층류화염속도에 기인하는 것으로 생각된다(50/50 H<sub>2</sub>/CO의  $S_{u,max}$ : 약 2.0 m/s; CH<sub>4</sub>의  $S_{u,max}$ : 약 0.4 m/s).

#### 4. 결론

동축공기가 있는 H<sub>2</sub>/CO 합성가스의 노즐에 부착된 화염의 안정성 실험을 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

합성가스 단일제트화염의 detachment 연료속도는 CO의 몰분율이 증가할수록 감소하였는데 이는 CO 몰분율 증가에 따른 층류화염속도의 감소, 화염이 안정화되는 밀단의 위치에 영향을 미치는 stoichiometric 공기-연료 질량비의 감소에 따른 것으로 생각된다.

동축공기 노즐의 크기는 화염안정성에 영향을 미치지 못하고 동축공기의 속도만이 안정성에 영향을 미친다. 하지만 화염겨집이 아닌 부상화염이 나타나는 조건 및 부상화염의 날림에는 크게 영향을 미친다. 또한 연료와 동축공기 사이의 림 두께는 화염의 detachment 안정성에 큰 영향을 미친다.

동축공기가 있는 합성가스(50/50~100/0% H<sub>2</sub>/CO)는

연료속도와 동축공기속도로 나타나는 detachment 안정성 그래프에서 모두 증가-감소의 비단조 경향을 보인다. 증가구간의 detachment는 노즐 림 위에 형성된 화염 밀단의 희박가연한계에 의해 지배되고 감소구간은 large-vortex에 의한 높은 strain으로 인해 발생하는 국소 소멸에 의해 지배된다.

#### 후기

본 연구는 교육과학기술부의 중견연구지원사업(0498-20110009)과 서울대학교 항공우주신기술연구소(IAAT)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] R. M. Jones, N. Z. Shilling, IGCC Gas Turbines for Refinery Applications, Report 4219, GE Power Systems, Schenectady, NY 12345, 2003.
- [2] T. C. Lieuwen, V. Yang, R. Yetter, Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications, CRC Press, U.S.A., 2010.
- [3] C. Sung, C. K. Law, Fundamental Combustion Properties of H<sub>2</sub>/CO Mixtures: Ignition and Flame Propagation at Elevated Pressures, Combust. Sci. Technol. Vol. 180, No. 6, 2008, 1097-1116.
- [4] A. Vranos, E. D. Taback, C. W. Shipman, Stability Characteristics of Turbulent Hydrogen Dilute Diffusion Flames, Combust. Flame, Vol. 12, 1968, 253-260.
- [5] F. Takahashi, M. Mizomoto, S. Ikai, N. Futaki, Lifting Mechanism of Free Jet Diffusion Flames, Proc. Combust. Inst. Vol. 20, 1984, 295-302.
- [6] F. Takahashi, W. J. Schmoll, Lifting Criteria of Jet Diffusion Flames, Proc. Combust. Inst. Vol. 23, 1990, 677-683.
- [7] F. Takahashi, M. Mizomoto, S. Ikai, K. Tsuruyama, Stability Limits of Hydrogen/Air Coflow Jet Diffusion Flames, 28th Aerospace Science Meeting, 1990, AIAA-90-0034.
- [8] N. Papanikolaou, I. Wierzba, The Effects of Burner Geometry and Fuel Composition on the Stability of a Jet Diffusion Flame, Journal of Energy Resources Technology Vol. 199, 1997, 265-270.
- [9] N. T. Weiland, P. A. Strakey, Stability Characteristics of Turbulent Hydrogen Dilute Diffusion Flames, Combust. Sci. Technol. Vol. 181, 2009, 756-781.
- [10] F. Takahashi, L. P. Goss, Near-field Turbulent St-

- ructures and the Local Extinction of Jet Diffusion Flames, Proc. Combust. Inst. Vol. 24, 1992, 351-359.
- [11] N. T. Clemens, P. H. Paul, The Effects of Heat Release on the Near Field Flow Structure of Hydrogen Jet Diffusion Flames, Combust. Flame, Vol. 102, 1995, 271-284.
- [12] G. T. Kalghatgi, Blow-out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames. Part I: In Still Air, Combust. Sci. Technol. Vol. 26, 1981, 233-239.
- [13] J. E. Broadwell, W. J. A. Dahm, M. G. Mungal, Blowout of Turbulent Diffusion Flames, Proc. Combust. Inst. Vol. 20, 1984, 303-310.
- [14] K. N. Kim, S. H. Won, Characteristics of Turbulent Lifted Flames in Coflow Jets with Initial Temperature Variation, S.H. Chung, Proc. Combust. Inst. Vol. 31, 2007, 1591-1598.
- [15] S. Donnerhack, N. Peters, Stabilization heights in lifted methane-air jet diffusion flames diluted with nitrogen, Combust. Sci. Technol. Vol. 41, 1984, 101-108.
- [16] S. Kim, Y. Yoon, I. Jeung, Nitrogen Oxides Emissions in Turbulent Hydrogen Jet Non-premixed Flames: Effects of Coaxial Air and Flame Radiation, Proc. Combust. Inst. Vol. 28, 2000, 463-471.
- [17] M. J. Cohen, N. J. B. Ritchie, Low-Speed Three-Dimensional Contraction Design, J. R. Aeronaut. Soc. Vol. 66, 1962, 231-236.

---

접수일 : 2012. 01. 18  
심사완료일 : 2012. 02. 20