

합성가스-순산소 예혼합 화염의 연소특성

조주형*, 박준홍**, 전중환**, 안국영*, 김한석[†]

*한국기계연구원, **부산대학교 기계공학부

Syngas-Oxygen Combustion Characteristics of a Swirl-Stabilized Premixed Flame

JUHYEONG CHO*, JUNHONG PARK**, CHOONGHWAN JEON**, KOOKYOUNG AHN*, HANSEOK KIM[†]

*Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Geumjeong-gu, Pusan, 609-735, Korea

ABSTRACT

The present study deals with experimental investigations on the syngas-oxygen combustion characteristics of a swirl-stabilized premixed flame in a 10 kW combustor. The effect of hydrogen in syngas has been investigated with different swirl angles to identify the role of hydrogen and swirl strength on the flame stability and CO emissions. The results show that hydrogen addition extended the blowout limit while narrowing the flashback limit. The dependence of blowout on the swirl angle is negligible while the dependence of flashback on the swirl angle is evidenced by two regimes depending on the amount of hydrogen. CO emission is decreased with increasing excess O₂ supply or increasing hydrogen content. Chemiluminescence diagnostics is utilized to provide information on the structure of a swirl-stabilized premixed flame. The OH chemiluminescence intensity is more concentrated near the burner exit with an increase in the hydrogen content, which results from high reactivity of hydrogen.

KEY WORDS : Premixed combustor(예혼합 연소기), Hydrogen(수소), Swirl-stabilized(선회기로 안정화된), Chemiluminescence(자발광), Blowout/flashback(소염/역화), CO emission(일산화탄소배출)

Nomenclature

S : swirl number

AFT : adiabatic flame temperature

Θ : swirler vane angle

d : swirler diameter

d_h : swirler hub diameter

1. 서 론

석유의 고갈로 인한 에너지 위기가 대두되면서

[†]Corresponding author : haskim@kimm.re.kr

[접수일 : 2010.11.3 수정일 : 2010.12.7 게재확정일 : 2010.12.17]

이에 대응할 수 있는 석탄 혹은 바이오 폐기물의 에너지화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 대체 에너지원은 연소특성 및 오염물질 배출특성이 좋지 않아 직접 연소시켜 에너지화 하기 보다는 가스화(gasification)하여 얻어진 합성가스를 연료로 사용하여 발전시스템 및 화학반응공정 등에 적용하는 방식이 선호되고 있다¹⁾. 또한 기후변화대응과 관련하여 지구온난화의 주원인으로 알려져 있는 CO₂ 배출 억제를 위하여 연소시스템 구축 시 CO₂ 회수가 가능한 순산소 연소 방식을 적용할 필요성이 대두되고 있다. 순산소 연소는 산화제로 공기 대신에 순산소를 공급하는 방식으로 고농도의 이산화탄소 회수가 가능한 연소 방법이며 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다²⁻⁵⁾.

가스화방식 및 원재료의 물성에 따라 합성가스의 성상에는 다소 차이가 있지만 순산소연소를 하는 경우 단일화염 온도가 연소기 내부의 열 손상이 발생할 정도로 상승할 가능성이 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 배출가스인 CO₂와 H₂O의 혼합가스 중 CO₂ 혹은 H₂O의 일부를 연소기로 재순환하여 산소와 혼합하여 연소시킴으로서 화염의 온도를 낮추는 방법을 채택하고 있다. 그러나 CO₂ 혹은 H₂O를 산소에 혼합한 산화제로 이용하는 경우 공기에 포함된 N₂와는 열적 물성치가 다르다. 특히 합성가스에 많이 포함된 수소는 연소에 많은 영향을 주기 때문

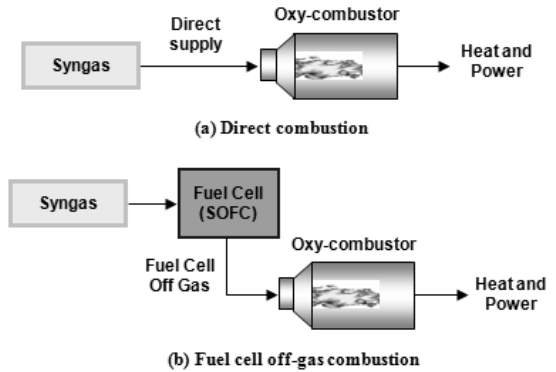


Fig. 1 Two scenarios for syngas combustion.

에 일반 LNG 혹은 LPG용 공기 연소기를 보완 없이 사용하면 연소효율 및 성능이 저하될 가능성이 있으므로 연소기 설계 시 이를 반영하여야 한다. 또한 배가스의 CO₂를 고농도로 응축해야 하기 때문에 최소한의 과잉 O₂ 조건에서 최소한의 배출물이 생성되도록 연소기를 설계하여야 한다⁶⁾.

본 연구에서는 CO와 H₂ 그리고 CO₂가 주성분인 합성가스를 이용한 순산소 연소기의 적정 설계를 위하여 lab-scale의 예혼합형 순산소 연소기를 제작하여 합성가스 순산소 연소 특성을 파악하고자 하였다. H₂와 CO의 합성가스 조성비는 RDF(refuse derived fuel)의 가스화로 얻어진 가스조성(H₂ 40 vol%, CO 40 vol%, CO₂ 20 vol%)을 기준으로 하였다. Fig. 1과 같이 추

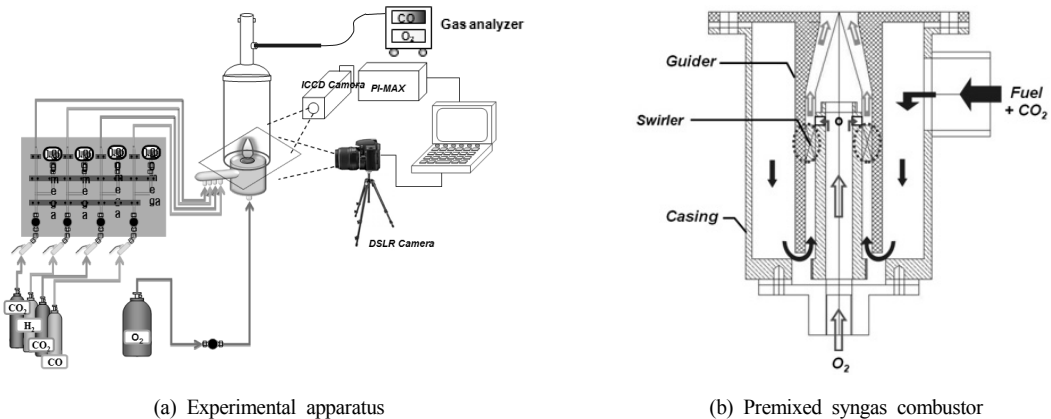


Fig. 2 Experimental apparatus with premixed flame combustor.

후 IGFC(integrated gasification fuel cell combined cycle)에서와 같이 연료전지를 이용하는 경우에 연료전지의 수소이용률을 고려하여 H₂와 CO의 조성비를 결정하였다. 이러한 CO와 H₂의 조성비 변화 및 선회기의 선회강도가 합성가스 순산소 연소에 미치는 영향을 예상하기 위하여 희석가스로 CO₂를 이용하여 순산소 예혼합 연소버너의 소염현상과 역화특성을 분석하였다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 광간섭 필터와 ICCD 카메라를 사용하여 OH radical 분포를 측정하고 각 조건에서의 배가스 분석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

합성가스 순산소 예혼합 연소 실험장치는 Fig. 2와 같이 순산소 연소기, 연료 및 산화제 가스 공급장치, 그리고 배가스 측정 장치 및 가시화 장치로 구성되어 있다. Fig. 2(a)와 같이 합성가스의 성분인 H₂, CO, CO₂와 산화제인 O₂는 보정된 오리피스와 니들 밸브를 이용하여 유량을 조절하여 연소기에 공급하였다. 배가스의 농도 측정을 위하여 수냉식 포집관을 연소실 출구에 설치하였다. 포집된 가스는 수냉관에 의하여 냉각된 후 수분제거기(water trap)를 거쳐 가스 분석기(Horiba VA/VS 3000)에 공급하여 측정하였다. OH 자발광 측정을 위하여 307nm의 필터(narrow band interference filter)와 ICCD 카메라를 사용하였다. 모든 조건에서 증폭을 128, 노출을 80 ms로 하여 100 프레임에 대하여 평균한 값을 이용하였다. 그리고 결과는 3-point Abel inversion technique을 이용하여 반경방향으로의 OH radical 분포를 예상할 수 있게 하였다⁷⁾. 실험에 사용된 예혼합 연소기의 형상은 Fig. 2(b)와 같이 H₂, CO, CO₂는 연소기 입구에서 예혼합되어 연소기로 공급되어 선회기를 통과하고, 산소는 연소기 중심으로 공급되어 연소기 노즐 출구 상류 5cm 지점에 직경 2mm인 6개의 가스 분출구를 통하여 분사되어 연소기 내부의 예혼합실에서 선회기를 통과한 합성가스와 혼합되어 연소실 입구로 공급되는 구조를 취하였다⁸⁾.

화염의 안정성을 위하여 제작된 선회기의 선회각

Table 1 Gas flow-rates

Gas	Flow rate (kg/hr)	Remarks
H ₂	0.14	6.6 wt% _{OH2}
CO	1.93	
O ₂	2.31	
H ₂	0.06	2.1 wt% _{OH2}
CO	2.84	
O ₂	2.21	
CO ₂	14.40	1800K (6.6wt% _{OH2} 기준)

은 30도, 45도, 그리고 60도의 3종류를 이용하여 실험을 수행하였으며 선회수(swirl number, S)는 다음과 같이 정의하였다.

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right] \tan \theta \quad (1)$$

선회각도에 따른 선회수는 S=0.471(30도), S=0.816(45도), S=1.41(60도)로 선회각이 증가함에 따라 선회강도가 높아짐을 알 수 있다⁹⁾.

연소실의 형상은 화염가시화를 위하여 직경이 150mm인 원형 단면에 높이 700mm의 내열유리를 사용하였다.

Table 2 Experimental conditions

Swirl angle	Guider hole diameter (mm)	Excess O ₂ (%)	Variation
30	20	5	Swirl strength
45	20	5	
60	20	5	
45	15	5	Mixture velocity
45	18	5	
45	20	5	
45	20	5	Excess O ₂
45	20	4	
45	20	3	
45	20	2	
45	20	1	

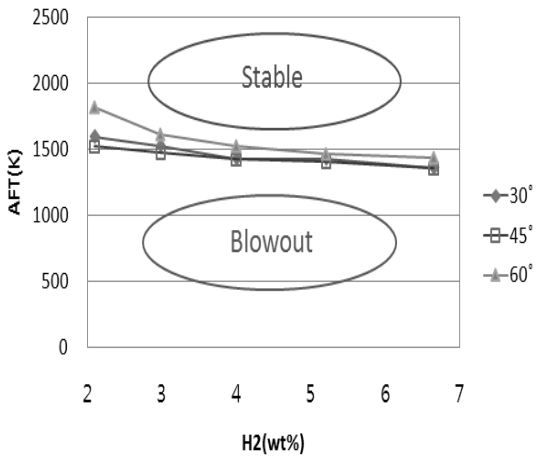


Fig. 3 Swirl angle effect (Blowout).

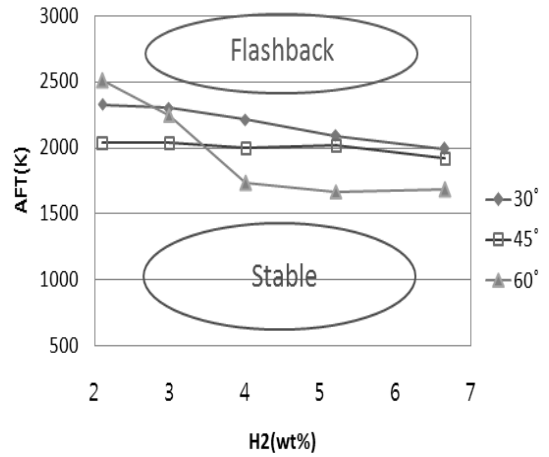


Fig. 4 Swirl angle effect (Flashback).

화염 안정성 및 가시화 실험은 연료의 발열량을 10kW 기준으로 CO와 H₂의 조성비를 변화시키면서 Table 1의 유량조건으로 실험을 수행하였다. O₂ 공급량은 화학적 당량비(equivalence ratio, Φ)를 기준으로 과잉 산소공급률(excess O₂ ratio)을 5% 이내로 하였으며 선회각 및 혼합가스 분출속도의 영향을 살펴보기 위하여 Table 2와 같이 선회각 및 노즐출구 면적을 조절하여 실험을 수행하였다. 화염온도 조절용 CO₂는 합성연료와 예혼합하여 공급하였으며, 연료 및 산화제는 모두 상온으로 공급하였다. 그리고 본 실험 조건에서 H₂와 CO의 조성 변화에 대한 혼합가스 유속의 변화는 3% 미만이었다.

3. 실험결과

3.1 선회각에 따른 화염 특성

합성가스를 이용한 순산소 화염의 화염안정성 특성을 예상하기 위하여 CO에 대한 H₂ 조성비를 변화시킨 10kW 발열량의 합성가스 조성에 CO₂ 공급량을 조절하여 화염의 소염(blowout) 및 역화(flashback) 특성을 관찰하였다. Fig. 3에는 각각의 선회각 및 CO에 대한 H₂ 공급 조건에서 CO₂의 공급을 증가시켜 소염되는 경우를 연소한계 조건(blowout)으로 가정하여 단열화염 온도를 기준으로 선회각도별로

그 결과를 나타내었다. Fig. 3의 결과로부터 수소의 조성비가 증가할수록 더 낮은 단열화염의 혼합가스에서 화염이 존재하며 선회각에 의한 영향은 크지 않음을 알 수 있다. Table 1에서 언급된 가스공급유량조건을 이용하여 20mm직경의 노즐출구로부터의 혼합가스 분출속도를 예상해보면 H₂가 6.6wt%인 경우는 11.5m/s, H₂가 2.1wt%인 경우는 11.3m/s로서 H₂의 조성변화에 따른 분출가스의 유량 변화는 3% 미만임을 알 수 있다.

따라서 합성가스의 수소함유율이 증가 할수록 더 낮은 단열화염 온도 조건에도 화염이 존재하는 이유는 분출가스유속의 영향보다는 CO보다 H₂의 연소반응성이 좋기 때문이다. 이로인해 H₂의 조성이 클수록 화염이 안정화되어 CO₂공급량이 증가해도 화염이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

또한 화염의 소염특성에 대한 선회각도의 영향은 본 실험 조건에서 비교적 적게 나타났다.

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 방법으로 온도 조절용 CO₂가스를 감소 시켰을 때 화염이 혼합가스 분출구속으로 역화되는 조건에서 혼합가스의 단열화염 온도를 계산하고 이를 수소 조성비 및 선회각의 함수로 나타낸 결과이다. Fig. 4의 결과로부터 수소의 조성비가 증가할수록 낮은 단열화염의 혼합가스에서 화염이 역화됨을 알 수 있다. Table 1에서 언급하였

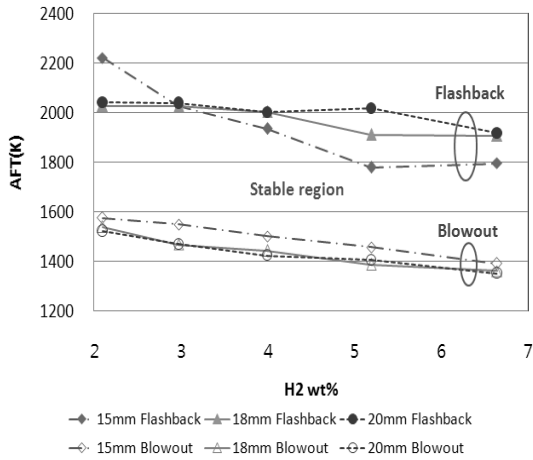


Fig. 5 Flow velocity effect.

듯이 수소의 조성비에 따라 분출가스의 유량 변화는 작기 때문에 혼합가스에 수소가 증가 할수록 낮은 단열화염 온도 조건에 화염이 존재한다. 이로부터 분출가스의 유속의 영향보다는 CO보다 H₂가 화염 전파속도가 크기 때문으로 H₂의 조성이 클수록 화염 역화가 쉽게 발생함을 알 수 있다. 선회각이 30도일 경우 45도일 경우보다 역화가 덜 일어남(단열화염온도 증가)을 알 수 있는데 화염길이 및 안정성 측면에서는 45도일 경우가 더 적합하다. 선회각도가 60도일 경우에 화염 역화는 수소 조성에 따라 비교적 영향을 많이 받는다. H₂의 조성이 큰 경우(H₂ 4wt%이상)에는 선회각이 클수록 중심부의 분출구로 향하는 고온의 내부 재순환 유동이 증가하여 연소특성이 좋은 수소가스의 점화에너지가 낮아지므로 낮은 단열화염온도의 혼합가스 조건에서 화염이 쉽게 역화됨을 알 수 있다.

그러나 H₂의 조성이 낮은 경우 고온의 재순환가스가 혼합가스의 점화에 미치는 영향이 작아지면서 선회각에 대한 일정한 경향을 나타내지 않지만 선회각이 큰 60도인 경우 역화가 어려운 이유는 재순환가스의 유량이 증가되어 이미 반응한 재순환가스가 희석가스로서 미연혼합가스에 공급되어 오히려 역화가 억제되는 것으로 예상되지만 이에 대한 추후의 연구가 필요하다.

3.2 혼합가스 유속에 따른 화염 특성

혼합가스의 분출구 유속에 대한 화염특성을 예상하기 위하여 45도의 스윙각을 이용하고 동일 발열량을 기준으로 하여 노즐 출구의 직경을 15mm, 18mm, 20mm로 변화시켰을 때의 화염의 소염 및 역화 특성을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 결과로부터 본 실험 조건에서 혼합가스 유속에 대한 화염특성이 뚜렷한 경향을 나타내지는 않았다. 그러나 노즐직경이 작아지는 경우(직경 15mm 사용)에 H₂ 3wt%이상 조건에서 소염 및 역화 시 단열화염온도가 각각 상승 및 하강하여 화염 안정화영역이 좁아짐을 볼 수 있다. 노즐직경이 증가하는 경우(직경 20mm 사용)에는 소염 및 역화 시 단열화염온도가 각각 하강 및 상승하여 화염안정화영역이 대체로 넓어짐을 볼 수 있다. 이는 혼합가스 분출속도가 증가하면(15mm 노즐직경의 경우) 화염을 유지하기 위한 화염속도가 증가해야 하고 따라서 소염이 발생하는 단열화염온도도 상승하게 된다.

역화의 경우에는 혼합가스 분출속도증가 자체보다는 분출속도증가로 인한 재순환가스 유량의 증가와 관련이 있다. 노즐분출유량에 대한 재순환가스 유량은 선회각도의 함수로서 주어진 선회각도에 대해 분출유량 증가 시 재순환가스 유량은 비례하여 증가하게 된다⁹⁾.

이로 인해 미연혼합가스로의 에너지 공급이 증가하여 수소의 반응성이 향상되므로 낮은 단열화염온도에서 역화가 일어나는 것으로 사료된다. 다만 수소함유량이 작은 조건(H₂ 2wt% 조건)에서는 수소반응성향상이 큰 영향을 미치지 못하므로 노즐직경 20mm인 경우와 비교하여 역화가 오히려 높은 단열화염온도에서 발생함을 볼 수 있다.

또한 세 가지 노즐직경의 경우에 대해서 수소조성비가 증가할수록 대체로 소염한계는 증가(단열화염온도 감소)하고 역화한계는 감소(단열화염온도 감소)함을 알 수 있다. 이렇게 혼합가스 소염과 역화 현상은 노즐분출유속, 재순환유동, H₂의 조성에 복합적으로 영향 받음을 알 수 있다.

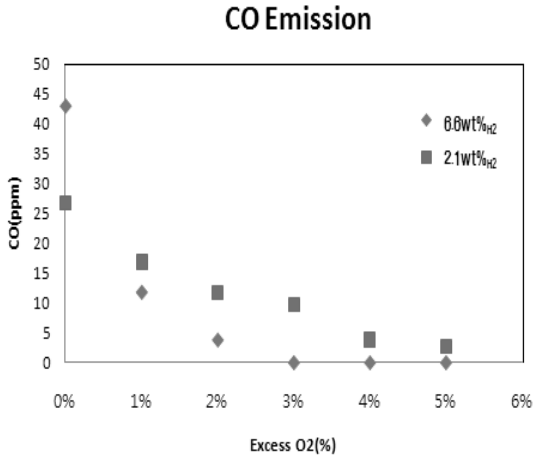


Fig. 6 Excess O₂ effect on CO emission.

3.3 과잉 O₂에 따른 배가스 특성

과잉 O₂비에 대한 연소특성을 예상하기 위하여 수소 조성비가 각각 6.6wt%_{H2}, 2.1wt%_{H2} 이고 발열량이 10kW인 혼합가스의 조성비에 대하여 선회각 45도의 연소기노즐을 사용하고 당량비 기준으로 O₂ 과잉비를 5%까지 변화시킨 경우 배가스 중 CO의 농도를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 결과로부터 두 합성 연료의 경우 단일 온도 조건, 발열량 그리고 과잉 O₂ 조건이 동일한 경우에 수소 조성비가 2.1wt%_{H2}의 경우보다 6.6wt%_{H2}의 경우에 CO의 배출이 저감된다. 이는 수소조성비가 높을 경우 연료 조성 중 C성분이 적어지고 또한 수소에 의한 연소특성이 향상되어 반응영역 내에서 CO의 산화가 용이해지기 때문인 것으로 판단된다. 마찬가지로 과잉산소공급률이 증가할수록 CO의 산화가 용이해져 완전연소반응이 일어나므로 CO의 배출이 감소된다.

다만 Fig. 6의 당량비조건(과잉산소 0%)에서 수소조성비에 대한 CO배출 경향성이 뒤바뀌는 이유는 당량비 근처에서는 CO배출이 급증하므로 산소량의 작은 변화에도 CO배출이 크게 달라질 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 즉 당량비 조건에서는 수소조성비의 차이보다는 산소량의 작은 차이에 의해서도 CO배출 경향성이 바뀔 수 있으며 수소조성비

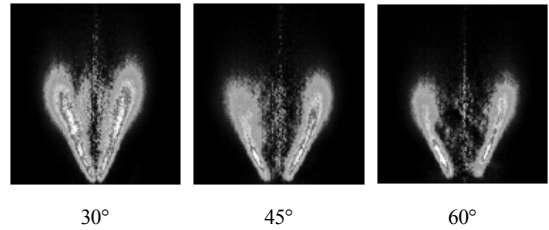


Fig. 7 OH radical image.

의 영향을 분석하기 위해서는 산소유량을 보다 정밀하게 조절해야 할 것으로 판단된다.

3.4 선회각 및 수소 조성비에 따른 화염 특성

Fig. 7은 선회각에 의한 화염 형상의 영향을 예상하기 위하여 수소조성 2.1wt%_{H2}, 단열화염온도 1970K의 공급 조건에서 선회각 변화에 대한 화염형상을 OH 필터를 이용하여 측정된 후 Abel 변환을 한 결과이다. Fig. 7의 결과로부터 재순환가스 유동의 영향으로 중심부에는 연소 영역이 존재하지 않는다. 선회각이 클수록 원심력 등으로 재순환가스의 유동이 증가되어 혼합가스의 노즐출구에서 화염 폭이 넓어지고 화염길이는 감소되는 것을 예상할 수 있다⁸⁾. 또한 Fig. 7의 OH radical 분포 결과로부터 선회각도가 증가할수록 재순환가스의 유동 증가로 연

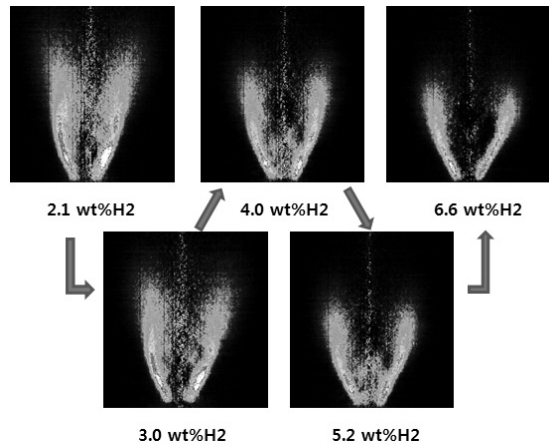


Fig. 8 OH radical images for various H₂ content.

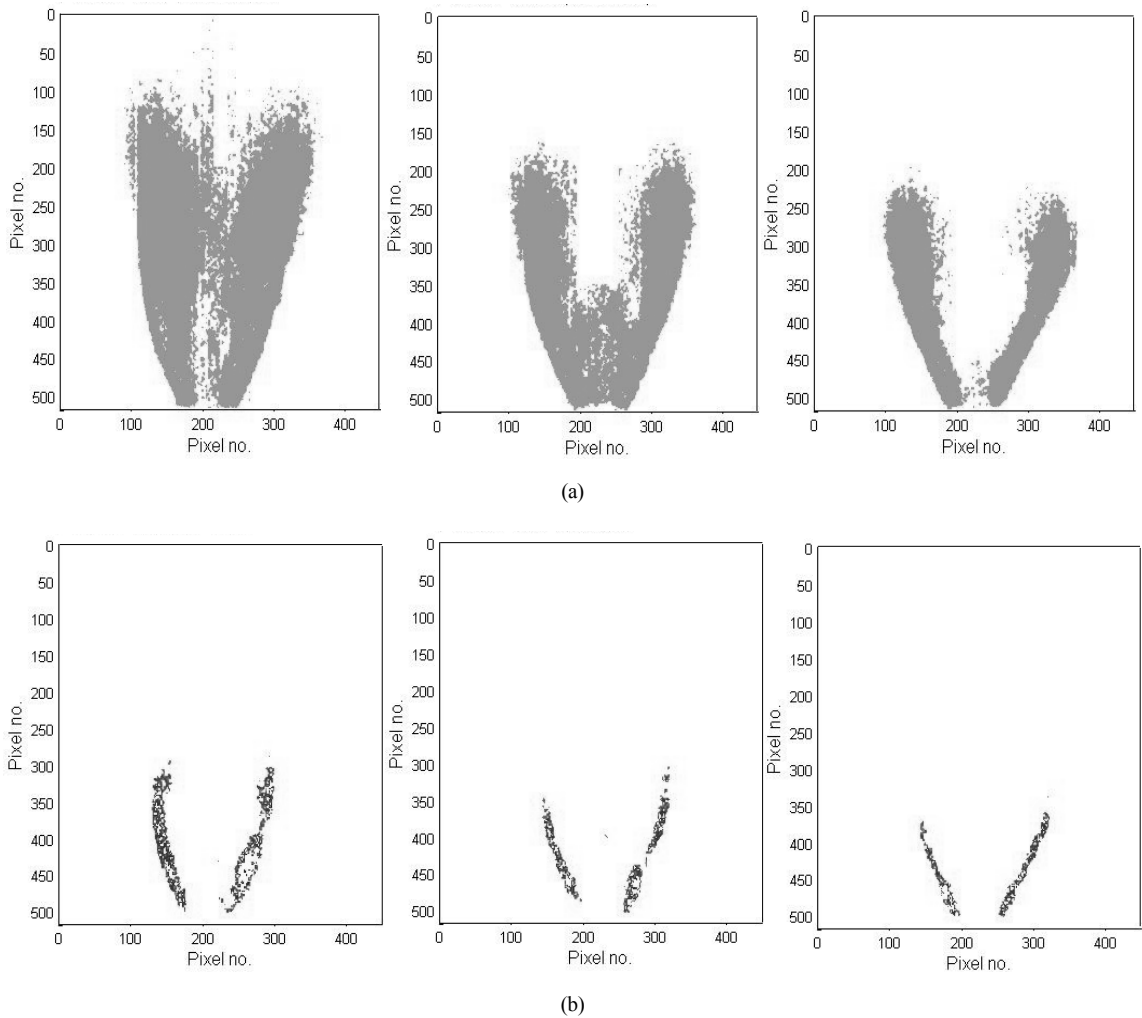


Fig. 9 Illustration of flame images for (a) overall reaction zones and (b) intense reaction zones for 2.1, 4.0, 6.6 wt%_{H₂}, respectively.

소영역이 희석됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 단일화염온도 1800K 조건에서 H₂의 조성 변화에 대한 OH radical 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 8의 결과로부터 수소조성비가 증가할수록 연소영역이 감소됨을 알 수 있다. 이것은 수소의 점화에너지 등 연소특성이 좋기 때문에 수소가 연소 반응을 활성화하여 반응시간이 단축되기 때문으로 예상된다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 연소영역에 대한 정량적인 비교를 위하여 Fig. 8의 2.1wt%_{H₂}, 4.0wt%_{H₂}, 6.6wt%_{H₂}

조건의 화염사진에 대한 이미지를 MATLAB을 이용하여 분석하고 그 결과를 나타내었다¹⁰⁾. Fig. 9(a)는 OH radical에 의한 전체반응영역(overall reaction zone)을 나타내고 Fig. 9(b)는 이 중 반응이 활발한 영역(intense zone)만을 나타낸 그림이다.

수소 조성비에 따른 연소영역의 변화를 살펴보기 위하여 Fig. 10에 이 두 영역의 면적을 계산하여 도시하였다. 수소 조성비가 증가할수록 전체반응영역과 활발한 반응영역 모두 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 수소첨가 시 연소특성이 향상되어

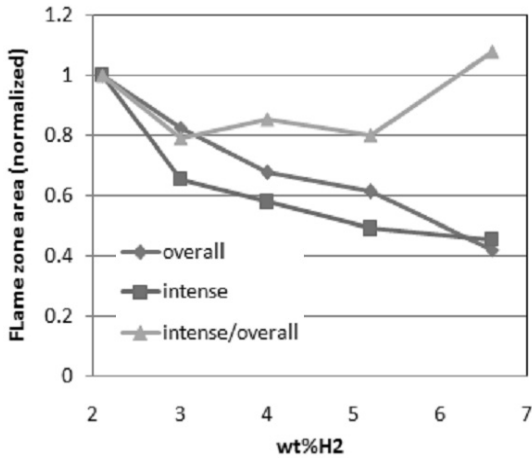


Fig. 10 The dependence of flame zone area upon H₂ content.

노즐출구에서 반응이 빨리 이루어기 때문에 판단된다. 전체반응영역에서 활발한 반응영역이 차지하는 비율은 수소 조성비가 6.6wt%일 때 가장 높아지며 이는 수소첨가에 의해 반응이 더욱 활성화되기 때문인 것으로 사료된다. 그렇지만 수소 조성비에 따라 일정한 경향을 보이지 않아 이에 대한 추후의 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 CO와 H₂가 주성분인 합성가스를 이용한 순산소 연소기의 설계인자를 도출하기 위하여 합성가스용 순산소 예혼합 연소기의 연소특성을 측정/분석하였다. 예혼합 연소기에 공급되는 CO, H₂ 조성비 및 희석가스로 연료에 혼합되는 CO₂의 혼합비와 선회각도 등 노즐형상이 순산소 연소특성 및 화염형상에 미치는 영향을 예상하기 위하여 광간섭 필터와 ICCD 카메라를 사용하여 선회각에 대한 소염 및 역화한계, 수소조성비에 대한 화염특성, 과잉산소공급비에 대한 배가스 특성을 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 본 예혼합 순산소 연소기에서 선회각의 선회각은 역화한계에 많은 영향을 미치며 소염한계에는 큰 영향을 미치지 않았다. 선회각이 60도인 경우 재순환 가스 유량이 너무 커지고 선회각이

30도인 경우에는 재순환가스의 유량이 너무 작게 되어 화염이 불안정해지며 선회각 45도인 경우 가장 안정된 화염을 형성한다.

- 2) 선회각이 클수록(60도인 경우) 재순환가스의 유동이 증가하여 재순환가스의 희석으로 연소 영역의 OH radical의 강도가 약해지며 연소기 출구부에서 반경방향의 유동이 증가하여 화염 폭이 증가하고 화염길이는 감소하게 된다.
- 3) 수소 조성비가 낮은 경우(2.1wt%_{H2})보다 높은 경우(6.6wt%_{H2})에 연소특성이 향상되어 반응영역 내에서 CO의 산화가 용이하므로 CO의 배출이 저감되며 과잉 산소공급률이 증가할수록 CO의 배출이 저감된다. 과잉 산소공급률 1% 미만에서는 산소의 원활한 공급이 이루어지지 않아 CO의 배출이 급증하게 된다.
- 4) 수소의 조성비가 증가할수록 수소에 의한 연소특성 향상으로 연소 반응이 활성화되므로 연소영역이 감소된다.

참 고 문 헌

- 1) K. H. Casleton, R. W. Breault, and G. A. Richards, "System Issues and Tradeoffs Associated With Syngas Production and Combustion", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 180, 2008, pp. 1013-1052.
- 2) B. J. P. Buhre, L. K. Elliott, C. D. Sheng, R. P. Gupta, T. F. Wall, "Oxy-fuel Combustion Technology for Coal-fired Power Generation", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, 2005, pp. 283-307.
- 3) <http://www.ipcc.ch>.
- 4) <http://www.cdrrs.re.kr>.
- 5) <http://www.ieagreen.org.uk>.
- 6) 김한석, 최원석, 조주형, 안국영, "메탄/순산소 예혼합 화염의 선회특성", *대한기계학회 논문집 B권*, Vol. 33, No. 5, 2009, pp. 343-348.
- 7) C. J. Dasch, "One-dimensional Tomography: A Comparison of Abel, Onion-peeling, and Filtered Backprojection Methods", *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, 1992.

- 8) H. S. Kim, Y. D. Lee, and K. Y. Ahn, "Hydrogen Enrichment Effects on NO Formation in Pre-mixed Methane Flame", Korea Hydrogen and New Energy Society, Vol. 18, 2007, pp. 75-84.
- 9) A. K. Gupta, D. G. Lilley, and N. Syred, "Swirl Flows", Abacus press, UK, 1984.
- 10) MATLAB, ver 7.0, The Mathworks, Inc., 2004.