

합성천연가스의 조성변화에 따른 확산화염 연소특성

오정석^{*†} · 동상근^{*} · 양제복^{*}

* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구단

Characteristics of Non-premixed Synthetic Natural Gas–Air Flame with Variation in Fuel Compositions

Jeongseog Oh^{*†}, Sangeun Dong^{*} and Jebok Yang^{*}

* Energy Efficiency Department, Korea Institute of Energy Research

(Received April 3, 2013 ; Revised July 22, 2013 ; Accepted July 23, 2013)

Key Words: Coal Gasification(석탄 가스화), SNG(합성천연가스), Visible Flame Appearance(가시화염형상), Chemiluminescence(자발광), Spectrometry(분광분석)

초록: 석탄을 개질한 합성천연가스의 조성변화에 따른 화염의 연소특성에 대하여 연구하였다. 본 연구의 목적은 동축 공기 합성천연가스 확산화염을 구현하여 연료조성에 따른 화염안정성과 화염구조, 분광특성, 온도분포를 실험적인 방법으로 연구하는 것이다. 각 화염의 분광특성을 관찰하기 위하여 분광기를 사용하였으며 연소장 내 온도측정을 위하여 K 형 열전대를 사용하였다. 연료 분사기 출구속도는 $u_f=5\sim 40$ m/s 사이에서 조절하였고 공기 분사기 출구속도는 $u_a=0\sim 0.43$ m/s 사이에서 조절하였다. 연소 동특성에 대한 실험을 통해 합성천연가스에 수소 성분이 증가하면 화염안정화 영역이 증가하고 부상화염 높이가 낮아져 화염길이가 짧아지는 것을 알 수 있었다.

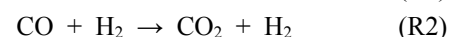
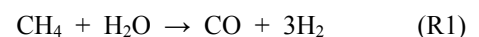
Abstract: The combustion characteristics with variations in synthetic natural gas (SNG) compositions were studied in a lab-scale combustor. The objective of the current study is to investigate the flame stabilization, flame structure, and spectrometry in a non-premixed SNG flame with varying fuel compositions. For the analysis of light emission in SNG flames, we used a spectrometer. As experimental conditions, the fuel jet velocity at the nozzle exit u_f was varied from 5 to 40 m/s and the coaxial air velocity u_a was varied from 0 to 0.43 m/s. The experiments showed that the flame stability increased with the hydrogen component in SNG

1. 서론

원지난 세기 두 차례에 걸친 오일쇼크 이후 에너지의 효율적인 이용이 강조되어 왔으며 생활수준 향상과 함께 환경오염에 대한 관심 증가로 공해물질 배출저감이 사회적 관심사가 되었다. 금세기 들어 화석연료 사용으로 인해 대기 중으로 방출되는 온실가스양이 급증하였다. 이러한 이유로 지구온난화에 따른 기후변화로 인해 세계 각국이 고심한 결과 이산화탄소 포집 및 저장(carbon capture and storage)과 함께 그간 경제성을 이유로 개발 순위에서 밀려난 자원들을 기술의 성숙과 더불어 새로이 평가하기 시작했다. 이

러한 시도들의 연장선상에서 발열량이 낮아 사용빈도가 낮았던 저급탄을 석탄가스화 또는 연료개질 과정을 통해 고품질의 합성가스(synthetic gas)를 생산하려는 연구가 미국과 일본, EU 등 에너지 선진국들을 중심으로 활발히 수행되고 있다.⁽¹⁾

일반적으로 개질기를 이용한 합성가스 생산방법으로 탄화수소계열 연료를 적정한 온도(800 °C)와 압력(20 bar) 조건에서 수증기를 가하여 수소와 일산화탄소, 이산화탄소 등으로 개질하는 방식을 사용한다. 메탄 개질반응은 아래의 화학반응식 (R1), (R2)과 같다.



† Corresponding Author. jeongs5@kier.re.kr

하면 탄소 성분이 근원적으로 제거된 청정연료 수소를 생산할 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 저급석탄에서 생산된 합성가스는 석탄의 종류와 채굴 시기에 구애받지 않고 일정한 품질을 보장받을 수 있는 장점이 있다.

합성가스를 상업적으로 이용하기 위하여 이를 도시가스에 희석하여 사용하기도 하는데 이를 합성천연가스(synthetic natural gas; SNG)라고 한다. 합성천연가스의 경제성은 대량 소비를 전제로 한 대량생산 방식으로 생산단가를 낮추는 것이다. 이를 위해선 제조설비의 고도화 및 최적화 못지않게 합성천연가스 배관망이 잘 구축되어 있어야 한다. 현재 합성천연가스를 도시가스에 희석하여 기존 도시가스 배관망을 사용하여 공급하려는 연구가 한국가스공사를 중심으로 진행 중에 있다.

Boivin 등⁽²⁾은 수소와 일산화탄소를 주성분으로 하는 합성가스 화염의 화학반응식을 4단계로 간략화하는 연구를 수행하였다. 이를 통해 화학반응식을 이용한 해석을 수행하여 압력, 온도, 반응물의 조성변화에 따른 층류화염전파속도 및 자발지연시간을 구하여 실험결과와 비교하고 반응식을 검증하였다.

Weiberg 등⁽³⁾은 동축류 메탄-공기 층류 부분 예혼합화염을 대상으로 화염 내부에서의 개질효과를 연구하였다. 그들은 연료량을 고정하고 공기량을 조절함으로써 부분 예혼합 화염을 구현하였고 화염이 이중 화염구조를 가질 때 연소장 내 예열지역에서 연료개질의 영향으로 일산화탄소와 수소가 검출되었다고 보고하였다. 이때 합성석영관을 이용하여 포집한 일산화탄소 농도는 최대 10% 이내였고 직경 30 μm 인 K 형 열전대를 이용하여 측정된 연소영역에서의 온도는 최대 1500°C 이내였다고 보고하였다.

합성가스에는 수소와 일산화탄소가 다량 포함되어 있으므로 도시가스에 이를 희석할 경우 혼합가스의 조성이 달라지고 연소특성 또한 달라지므로 배관 또는 연소기에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 합성천연가스의 조성변화에 따른 화염의 연소 동특성을 연구하고자 한다. 그러므로 본 연구의 목적은 조성을 달리한 합성천연가스를 공기와 연소할 경우 연소기 내에서 화염안정성을 살펴보고 가시화염의 구조 및 분광특성을 측정하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 실험장치

합성천연가스의 조성변화에 따른 연소상태 변

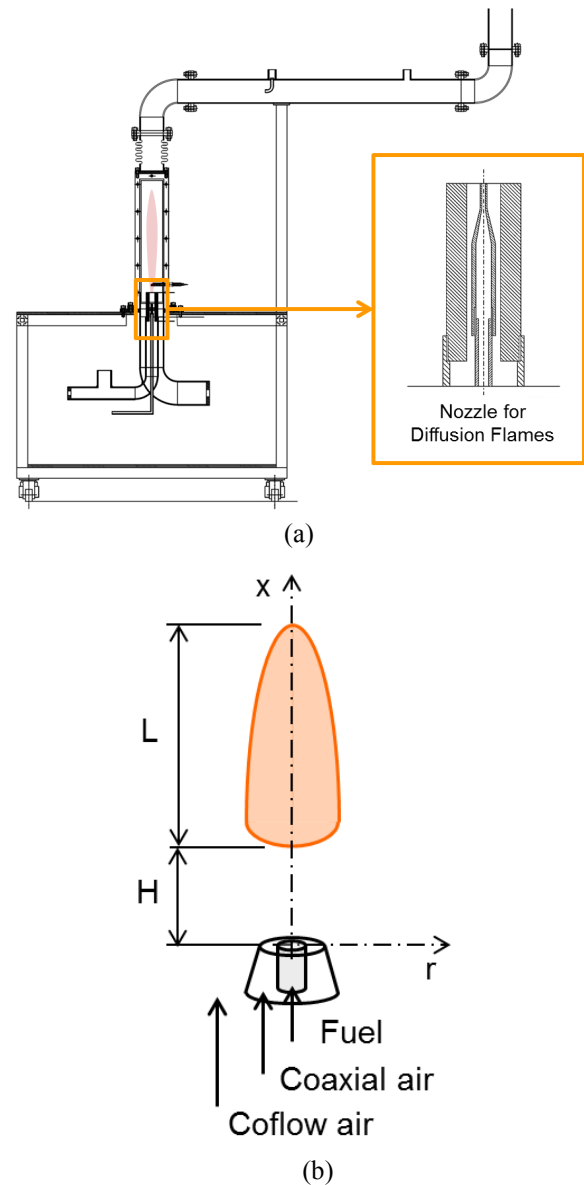


Fig. 1 Schematic of a lab-scale combustor: (a) a cross section of a burner and (b) description of a non-premixed lifted flame

화를 관찰하기 위하여 동축형 연소기를 제작하였다. Fig. 1(a)는 연소기 및 동축형 분사기의 단면을 나타낸 그림이다. 연소기는 가로 및 세로가 200×200 mm이고 높이는 800 mm으로 직육면체형상이다. 화염의 광학적 접근 및 계측을 위하여 측면을 합성석영관으로 제작하였다.

연소기 아래쪽 가운데에는 동축형 분사기를 장착하였으며 연료 분사기 출구 직경(d_f)은 2 mm이고 동축 공기 분사기 출구 직경(d_a)은 20 mm이었다. 연료와 동축형 분사기 주위로 연소기내 전체 당량비(ϕ_G)를 일정하게 조절하면서도 화염의

Table 1 Fuel property with varied SNG compositions (unit: mol %)

Group	Mark	C ₁	C ₂	C ₃	IC ₄	NC ₄	IC ₅	N ₂	H ₂	
N gas	1	N0.0	92.46	5	1.46	0.31	0.34	0.02	0.40	0.0
	2	N1.0	91.05	4.93	1.96	0.31	0.34	0.02	0.40	1.0
	3	N3.0	88.26	4.78	2.94	0.30	0.33	0.02	0.38	3.0
Reference	4	CH ₄	100	-	-	-	-	-	-	-
C gas	5	C0.0	95.27	-	4.73	-	-	-	-	0.0
	6	C1.0	93.82	-	5.18	-	-	-	-	1.0
	7	C3.0	90.95	-	6.05	-	-	-	-	3.0

Table 2 Experimental condition

Fuel Type		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Fuel Type		N0.0	N1.0	N3.0	CH ₄	C0.0	C1.0	C3.0
Flow Velocity, u [m/s]	u _F	5~40						
	u _A	0~0.43						
Reynolds Number, Re	Re _F	629~5031						
	Re _A	0~460						
Froude Number, Fr	Fr _F	2175~81633						
	Fr _A	0~1.11						

유동장에 영향을 주지 않게 하기 위하여 균일하게 공기를 흘려줄 수 있는 주위류 주입구를 장착하였다.

연소기로 주입되는 연료와 공기량을 제어하기 위하여 질량유량계(mass flow meter and controller; MFM and MFC, 100 lpm; 5850E, Brooks Instrument Co., Hatfield, PA, USA)를 사용하였다. 각각 가스별 질량유량계는 건식 체적유량계(dry flow test meter, 100 lpm; DA-16A-T, Sinagawa Co., Tokyo, Japan)로 교정하였고 이를 데이터 획득 장비인 LabVIEW(NI cDAQ 9172, 9205, and 9263, National Instruments Co., Austin, TX, USA) 장비를 이용하여 제어하였다. 유량 오차는 0.5%이내였다.

연료의 조성변화에 따른 화염변화를 관찰하기 위하여 가시화염사진을 촬영하였다. 가시화염 촬영을 위하여 디지털 일안반사식 사진기(D300s, Nikon Co., Tokyo, Japan)를 사용하였다. 이때 상용 표준 줌렌즈(Nikkor AF-S 24~70mm f/2.8G ED, Nikon Co., Tokyo, Japan)를 사용하였다. 가시화염 사진은 각 실험조건별로 100장씩 촬영하였다.

Fig. 1(b)는 연소기 내에서의 부상화염을 개념적

으로 나타낸 그림이다. 원통형 안쪽관으로 연료를 주입하고 동축형 바깥쪽관으로 공기를 주입하며 전체 당량비를 일정하게 조절하기 위하여 동축공기를 사용하였다. 부상화염길이는 화염밀단에서 화염끝부분까지의 거리로 정의하였다. 이때 문턱값을 화염 최대강도의 25%로 하였다. 부상화염높이는 연료 분사기 출구에서 화염밀단까지의 거리로 정의하였으며 측정방법은 부상화염길이와 같은 방법을 사용하였다.^(4,5)

합성천연가스 화염의 발광특성을 분석하기 위하여 분광기(PI Acton SP2150, Princeton Instruments Inc. Co., Trenton, NJ, USA)를 사용하였다. 측정범위는 근자외선과 근적외선을 포함한 λ=100~1000 nm로 하였다. 분광측정 시 주변 산란광에 의한 잡신호를 제거함으로써 신호대 출력비를 높였다.

2.2 실험조건

합성천연가스 조성변화에 따른 화염변화를 관찰하기 위하여 Table 1에서와 같이 각각의 성분들을 변화시켰다. 크게 질소(N₂) 성분 함량 여부에 따라 N 가스와 C 가스로 나누었으며 이는 다시 수소

(H₂) 성분 함량에 따라 각각 N0.0, N1.0, N3.0 그리고 C0.0, C1.0, C3.0으로 세분화하였다.

그리고 이를 비교하기 위하여 메탄가스(CH₄)를 참고가스로 선정하였다. 여기서 C_n의 n은 연료분자 구조상의 탄소개수이고 I는 이성질체(isomer) 그리고 N은 탄소사슬화합물에 가지가 없는 상태(normal)를 의미한다.

Table 1에서 제시된 7가지 가스연료의 연소특성을 연구하기 위한 실험조건을 Table 2에 나타내었다. 연료의 조성은 합성가스를 도시가스에 희석하였을 때 기존의 설비에 적용 가능한 연료로서의 안정성과 사용성을 고려하여 제조하였다. 각 연료의 발열량은 약 10200 kcal/m³으로 하였고 웨버지수(We)를 약 13100으로 고정하였다.

연소기 내에서 화염의 크기와 질량유량계 작동범위를 고려하여 분사기 출구에서의 연료 속도(u_F)는 $u_F=5\sim 40$ m/s에서 조절하였고 공기 속도(u_A)는 $u_A=0\sim 0.43$ m/s으로 조절하였다.

Table 2에서 연료의 레이놀즈 수는 $Re_F=u_F \times d_F/\nu_F$ 로 정의하였고 연료의 프라우드 수는 $Fr_F=u_F^2/(g \times d_F)$ 으로 정의하였다. 여기서 u_F 는 연료 노즐 출구 속도, d_F 는 연료 노즐 출구 직경, ν_F 는 연료의 동점성 계수, g 는 중력가속도이다.^(6,7)

3. 결과 및 토의

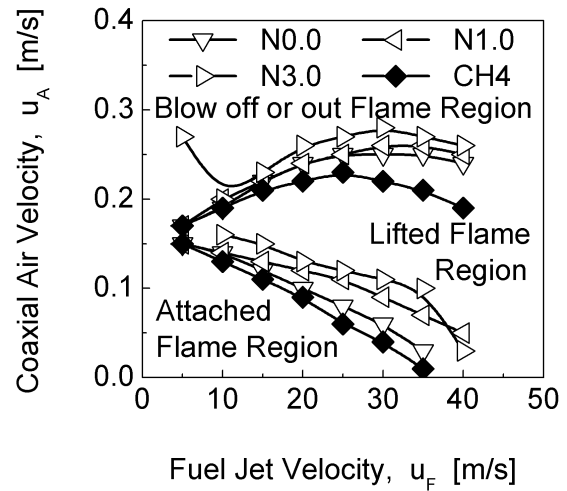
3.1 화염안정성

연료조성 변화에 따라 연소기에 영향을 미치는 요소 중에는 화염안정성과 발열량 그리고 유량 등이 있다.⁽⁸⁾ 화염안정성은 화염의 연소상태를 나타내는 것으로 연소기의 작동영역을 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다.^(9,10) 연소는 유동과 화학반응의 상호작용이므로 유동에 영향을 미치는 기하학적 요소들과 화학반응에 영향을 미치는 압력, 온도, 반응물의 조성 등이 복잡하게 얽혀 서로 영향을 미치기 때문이다.^(6,11)

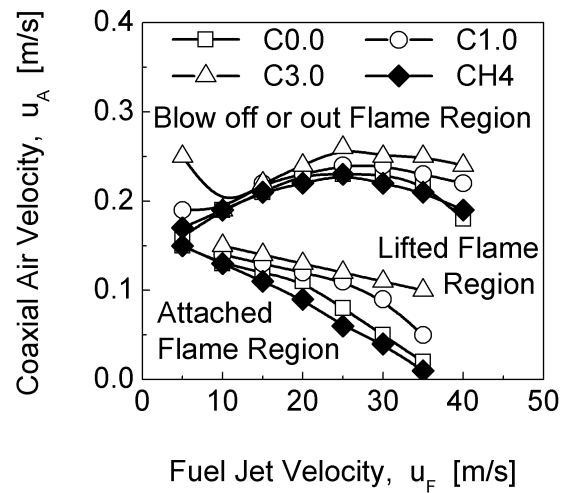
Fig. 2는 합성천연가스 확산화염의 연료조성 변화에 따른 연소기의 가연범위변화를 화염안정화지도(flame stabilization map)로 나타낸 실험결과이다.

화염안정화 지도는 크게 부착화염지역(attached flame region), 부상화염지역(lifted flame region), 소멸지역(blow off/out region)으로 나뉜다.

부상화염은 화염밀단이 분사기에 붙어있는 상태를 의미하고 부상화염은 화염의 밀단이 분사기에서 후류로 밀려나 공중에 떠있는 상태를 의미



(a)



(b)

Fig. 2 Flame stability map composed of attached flame region, liftoff flame region, and blow off or blow out region: (a) Case 1~4 and (b) Case 4~7

한다. 만약 화염밀단에서 화염전파속도가 국소유동속도와 일치한다고 가정하면 화염밀단에서의 연소상태 변화에 따라 부상화염 위치가 이동한다.

즉 화염밀단에서의 반응률이 떨어지면 화염전파속도가 줄어들고 화염밀단은 국소유동속도가 낮은 후류로 밀린다. 이와 반대로 화염밀단에서의 반응률이 높아지면 화염전파속도가 빨라져 화염밀단이 국소유동속도가 높은 분사기 출구 쪽 상류로 이동한다.

Oh와 Yoon에 따르면 동축공기 수소 난류확산화염에서 부상화염은 화염밀단에서 반경방향으로의 속도구배 그리고 연료농도 및 난류강도에 영향을 받는다고 한다.^(9,10)

소멸의 경우 화염밀단이 분사기에서 붙어 있다

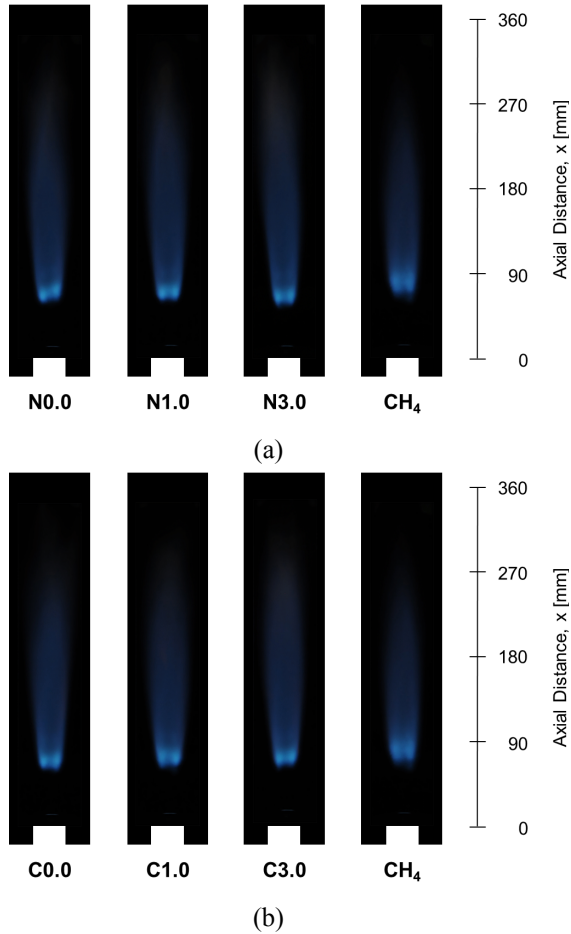


Fig. 3 Visible flame appearance of coaxial air and SNG diffusion flames with varied fuel compositions under the condition of $u_f=25$ m/s and $u_A=0.17$ m/s: (a) Case 1~4, (b) Case 4~7

가 화염의 부상 없이 바로 꺼지는 blow off 현상과 부상화염의 화염밀단이 분사기에서 후류로 밀려나면서 꺼지는 blow out 현상으로 구분할 수 있다. 소염에 영향을 미치는 인자로는 화염 밀단에서의 반응물의 농도구배와 난류에 의한 화염신장으로 알려져 있다.⁽¹²⁾

Fig. 2에서 가로축과 세로축은 연료 및 공기 분사기 출구에서의 속도이다. 즉 연료의 조성을 변화하지 않은 상태에서 화염안정화 과정은 분사기 출구에서의 속도 변화에 따라 부착화염에서 부상화염으로 변화하고 최종적으로 소염되는 과정을 거치게 된다.

Fig. 2(a)에서 Case 1~4까지 연료를 변화하였을 때 화염안정화 지도를 나타내었다. N 가스와 메탄가스를 대상으로 실험한 가시화염 촬영결과이다. Table 1에서 보듯 실험에 사용한 합성천연가스

는 N 가스 중의 C 성분과 수소 함유량에서 각각 차이가 난다.

N 가스 중에서 수소 농도가 증가할수록 부상화염영역이 넓어졌으며 같은 연료속도에서 소염되는 공기의 유속이 높아졌다. 즉 연료속도가 동일한 경우 연료 중 수소 성분이 증가할수록 보다 높은 공기속도에서도 화염이 소염되지 않았다. 이는 같은 유동 및 농도 조건에서 수소가 탄화수소 연료에 비해 확산속도가 빠르고 반응열이 높기 때문인 것으로 생각된다.

수소 첨가에 의해 화학반응열이 높아지게 이와 연이어 다음의 탄화수소 계열성분들의 활성화에너지원을 공급하여 전체 연료의 반응 또한 촉진시키게 된다. 즉 보다 높은 유속에서도 연소반응을 유지하게 된다. 이러한 이유로 인해 화염안정화 지도 전체를 놓고 볼 때 합성천연가스에 수소 성분이 증가할수록 화염안정화 영역이 넓어져 화염안정성이 좋아지는 것으로 생각된다. 이는 합성천연가스를 이용하는 실연소기 운전에서 수소함유량이 증가할수록 운전영역이 넓어지고 연소성이 좋아짐을 의미한다.

C 가스와 메탄가스를 대상으로 실험한 Fig. 2 (b)의 결과에서도 Fig. 2 (a)에서와 유사한 결과가 나타났다. 즉 C 가스에서 수소 함유량이 증가함에 따라 C0.0, C1.0, C3.0 순으로 화염안정화 영역이 넓어졌다. Fig. 2 (a)와 (b) 두 결과에서 수소가 함유된 N 가스와 C 가스가 메탄보다도 화염안정성이 좋았다. 그러나 기준화염인 메탄과 비교하였을 때 C1.0의 경우 부상화염영역에서 소폭 차이가 났으나 화염안정화 영역 크기에서는 거의 유사한 반면 N 가스의 경우에는 모두 화염안정화 영역이 메탄보다 넓게 나타났다.

동일한 수소 함유량 변화에 따른 N 가스와 C 가스의 가연범위 변화의 차이는 두 가스에서의 프로판 성분의 차이로 생각된다. 즉 메탄가스 보다는 프로판가스가 보다 많은 탄소 결합을 가지고 있으므로 이러한 탄소성분이 산화하는 데는 보다 많은 활성화 에너지와 시간이 소요된다. 그러므로 수소성분 증가에 따른 화학반응 촉진의 영향과 프로판 성분 증가에 따른 화학반응 지연 효과가 서로 상호작용을 하여 N 가스보다 C 가스의 가연범위 변화가 크지 않는 것으로 생각된다.

전반적으로 N 가스가 C 가스보다 화염안정화 영역이 넓으므로 상대적인 비교에서 N 가스가 C 가스보다 화염안정성이 좋은 것으로 나타났다.

3.2 가시화염

화염의 연소영역을 정의하는 방법에는 반응물의 혼합분율이 이론공연비인 조건을 기준으로 정의하나 반응물 농도 측정이 어려울 경우 온도를 또는 자발광을 이용하여 측정하는 방법을 이용한다.

자발광(chemiluminescence)은 연소열로 인해 반응물이 생성물로 전환하는 과정에서 중간생성물의 최외각 전자가 들뜬 상태에서 안정한 상태로 돌아갈 때 방출하는 빛이다.^(8,13)

가시화염사진은 화염의 연소영역내에서 방사되는 자발광 중 가시영역에 해당하는 파장영역만 촬영한 것으로 별다른 화상처리 없이 가시적으로 연소상태를 파악하는데 유용하다.

Fig. 3는 본 연구에서 사용된 조성을 달리한 합성천연가스의 부상된 확산화염 가시사진을 촬영하여 나타낸 실험결과이다.

Fig. 3(a)는 N 가스와 메탄가스 가시화염을 나타낸 것이다. N 가스의 수소 성분을 달리하였을 때 가시화염상 두드러지는 큰 변화는 나타나지 않았으나 메탄화염과 비교하였을 때 부상화염 높이가 전반적으로 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 탄화수소 연료에 수소가 첨가됨으로서 반응율이 증가하여 화염전파속도가 증가하므로 화염 밑단이 보다 높은 국소유동속도를 가지는 연료분사기 근처 상류로 이동한 것으로 생각된다.

Fig. 3(b)는 C 가스와 메탄가스의 가시화염 촬영 결과이다. Fig. 3(a)에서의 결과와 유사하게 C 가스의 수소 함유량을 달리하였을 때 외관상 두드러지는 변화는 나타나지 않았으나 메탄화염과 비교해 보았을 때 C 가스가 전반적으로 부상화염 높이가 낮게 나타났다. 이는 Fig. 3(a)에서 N 가스와 마찬가지로 탄화수소 연료에 수소가 첨가되어 화학반응속도가 빨라지고 화염전파속도가 증가하여 화염밑단이 고속인 상류로 전파하면서 부상화염 높이가 메탄화염에 비하여 상대적으로 낮아진 것으로 생각된다.

이러한 연료조성에 따른 부상화염의 높이변화 결과를 볼 때 만약 연료의 발열량이 동일하고 화염의 체적과 및 화염밑단의 표면적이 같다면 부상화염 높이 변화로 인하여 분사기 쪽으로의 방사거리가 줄어들어 분사기는 상대적으로 메탄화염보다 높은 열에 노출되게 된다. 이로서 합성연료에 수소량 증가는 부상화염높이 감소를 가져오고 분사기로의 열 누적량을 증가시킴으로서 열피로에 의한 손상을 가속화하는 원인이 된다.

3.3 분광분석

연료의 연소특성을 분석하는 방법 중 하나는 화염에서의 분광을 분석하는 것이다. 대표적인 라디칼에는 OH(hydroxyl radical), CH(methylidyne radical), C₂(carbon radical) 등이 있다. 일반적으로 단위부피당 라디칼의 농도는 압력이 증가함에 따라 감소하고 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 알려져 있다.^(14,15) 또한 자유 원자와 라디칼의 재결합은 반응영역에서의 열방출이 증가함에 따라 증가하는 성질을 가지고 있다.⁽¹⁶⁾

Fig. 4는 N 가스와 C 가스 그리고 메탄-공기 확산화염에서 방출되는 자발광을 분광기로 분석한 결과이다. 위쪽이 N 가스와 메탄을 비교한 결과이고 아래쪽이 C 가스와 메탄을 비교한 분광분석 결과이다. 전체적으로 가스별 유사한 파장분포를 보이고 있다. 특히 $\lambda_{OH}=283 \text{ nm}$, $\lambda_{OH}=306.4 \text{ nm}$, $\lambda_{CH}=430.1 \text{ nm}$, $\lambda_{C_2}=516.0 \text{ nm}$ 에서 파장(λ)이 두드러지게 나타났다. 이는 각각 OH, CH, C₂ 라디칼들이 방출할 때 나타나는 파장으로 생각된다.

선행연구문헌을 참고해 볼 때, H₂O는 180 nm, 270 nm, 630 nm에서 두드러지는 꼭대기 주파수를 가지며 100~1000 nm 사이의 광역대에서 넓게 방출한다. CO₂는 280 nm, 430 nm, 1500 nm에서 꼭대기 주파수를 가지며 200~500 nm 사이의 넓은 범위에서 방출한다. 그리고 CO는 230 nm, 430 nm에서 NO는 260 nm, 520 nm에서 방출하는 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾

Fig. 4에서의 분광결과를 분석해 보면 300~500 nm 사이에서 돌출되는 파장들이 조금씩 다르게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.

자발광은 국소연소특성에 크게 영향을 받으므로 300~500 nm 사이에서의 산발적으로 두드러져 나타나는 파장들은 확산화염 화염면 부근에서 난류 유동에 의해 다양하게 나타나는 국소 연소장의 변화 때문인 것으로 생각된다. 일반적으로 희박영역에서는 연료 중 수소 성분 증가가 반응영역의 OH 수밀도 증가를 가져오고 이는 OH*의 강도 증가로 이어진다. 그러나 OH* 생성은 CH와 O₂ 반응에 크게 영향을 받으므로 연료 중의 탄화수소 화합물 조성이 다양한 경우 분광특성은 좀 더 복잡한 형태를 가진다. 이는 각각의 연료에 함유되어 있는 조성들이 조금씩 다른 만큼 연소 시 중간 생성물들의 농도가 조금씩 차이 나는 것에 기인하는 것으로 생각된다.

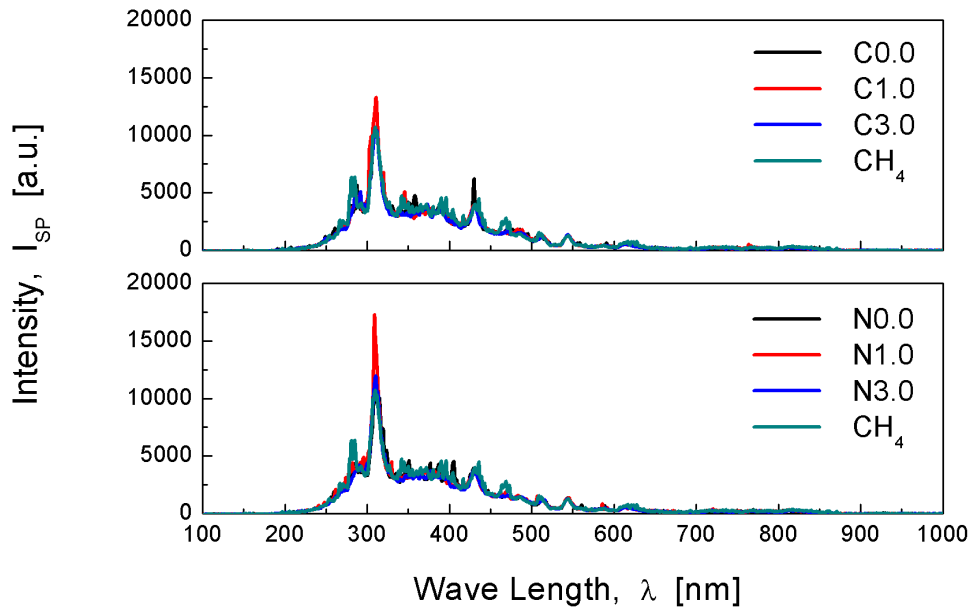


Fig. 4 Light emission spectrum of various composed SNG diffusion flames under the condition of $u_f=25$ m/s and $u_A=0.17$ m/s: Case 1~4 (upper) and Case 4~7 (bottom)

4. 결론

저급탄 석탄을 가스화하는 과정에서 산출물의 조성이 달라질 경우를 대비하여 합성천연가스의 연소특성을 연구하였다. 동축 공기 합성천연가스 확산화염의 화염안정성과 화염구조 및 분광특성을 분석하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 합성천연가스에 수소 성분이 증가할 경우 화염안정화 지도상에서 부상화염생성 속도 및 소염범위가 넓어져 화염안정성이 증가하였다.

(2) 가시화염 촬영결과 수소 성분 증가는 화염 반응율의 증가를 가져와 부상화염의 경우 부상높이가 감소하고 부착화염의 경우 화염길이가 감소하였다.

(3) 합성천연가스는 메탄에 비하여 고분자 탄소화합물 비율이 높아 예혼합 화염 연소시 화염 끝부분에서 휘염이 발생하였다.

참고문헌

(1) 2008, KEMCO Renewable energy center, Renewable energy RD&D strategy series - 04 Coal use, Bookshill co., Seoul, Korea,

(2) Boivin, P., Jimenez, C., Sanchez, A.L. and Williams, F.A., 2011, "A Four-Step Reduced Mechanism for SNG Combustion," *Combust Flame* 158, pp. 1059~1063.

(3) Weinberg, F., Carleton, F., Houdmont, R., Dunn-Rankin, D. and Karnani, S., 2011, "SNG Formation in Methane Flames and Carbon Monoxide Release During Quenching," *Combust Flame* 158, pp. 273~280.

(4) Kim, M., Oh, J. and Yoon, Y., 2011, "Flame Length Scaling in a Non-premixed Turbulent Diluted Hydrogen Jet with Coaxial Air," *Fuel* 90, pp. 2624~2629.

(5) Oh, J. and Yoon, Y., 2012, "Liftoff Height Behavior in a Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air," *Fuel* 91, pp. 134~140.

(6) Oh, J., Heo, P. and Yoon, Y., 2009, "Acoustic Excitation Effect on NOx Reduction and Flame Stability in a Lifted Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air," *Int J Hydrogen Energy* 34, pp. 7852~7861.

(7) Oh, J., Heo, P. and Yoon, Y., 2010, "EINOx Scaling in a Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Swirled Coaxial Air," *Int J Hydrogen Energy* 35, pp. 8715~8722.

- (8) Gaydon, A.G. and Wolfhard, H.G., 1978, "Flames – Their Structure, Radiation and Temperature - 4th Edition," *Chapman and Hall*, London, UK.
- (9) Oh, J. and Yoon, Y., 2010, "Flame Stabilization in a Lifted Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air," *Int J Hydrogen Energy* 35, pp. 10569~10579.
- (10) Oh, J. and Yoon, Y., 2010, "Nitrogen Dilution Effect on Flame Stability in a Lifted Non-premixed Turbulent Hydrogen Jet with Coaxial Air," *Fuel* 89, pp. 1492~1498.
- (11) Kim, M., Choi, Y., Oh, J., Yoon, Y., 2009, "Flame-Vortex Interaction and Mixing Behaviors of Turbulent Non-premixed Jet Flames under Acoustic Forcing," *Combust Flame* 156, pp. 252~2263.
- (12) Turns, S., 2002, "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications - 2nd Edition," McGraw-Hill, New York, USA.
- (13) Williams, FA., 1985, "Combustion Theory - 2nd Edition, Benjamin Cummings Publishing Company (Pearson)," San Francisco, USA.
- (14) Higgins, B., McQuay, M.Q., Lacas, F. and Candel, S., 2001, "An Experimental Study on the Effect of Pressure and Strain Rate on CH Chemiluminescence of Premixed Fuel-Lean Methane/Air Flames," *Fuel* 80, pp. 1583~1591.
- (15) Higgins, B., McQuay, MQ., Lacas, F., Rolon, J.C., Darabiha, N. and Candel, S., 2001, "Systematic Measurements of OH Chemiluminescence for Fuel-Lean, High-Pressure, Premixed, Laminar Flames," *Fuel* 80, pp. 67~74.
- (16) Berreta, L.G., da Rocha, C.J., Carinhana, D. Jr, Sbampato, M.E., de Oliveira, A.C. and dos Santos, A.M., 2003, "Emission Spectroscopy of CH Radical to Determine the Temperature of Ethanol Flame," 26th ENFMC 5 1-4 of ethanol Flame, 26th ENFMC 5, pp. 1~4.