수소 혼합에 따른 덤프 연소기내의 연소 특성에 관한 실험적 연구

김대희† · 홍정구*· 신현동**

An Experimental Study on the Combustion Characteristics with Hydrogen Enrichment in a Dump Combustor

Dae Hee Kim, Jung Goo Hong and Hyun Dong Shin

Key Words : Combustion Characteristics (연소 특성), Hydrogen Enrichment (수소 첨가), Primary reaction zone(주반응 영역)

Abstract

The combustion characteristics of a partially premixed flame in a dump combustor were studied to determine the effects of hydrogen enrichment in propane. Bluff-body was used for flame stabilization. Fuel mixtures containing a hydrogen mole fraction ranging from 0.1 to 0.5 were burnt at ambient pressure within a quartz chamber. Tests were carried out keeping the total reactant flow rate by adjusting the fuel and air flow rates. The fluctuations of pressure were measured by piezoelectric pressure sensor. The instantaneous flame structure and OH chemiluminescence images were described by High-speed Intensified Charged Coupled Device (HICCD) camera and Intensified Charged Coupled Device (ICCD) camera. The present results show that hydrogen enrichment in fuel changed the location of primary reaction zone from inner recirculation zone to turbulent shear layer and pressure signal. The reason is that chemical aspects take precedence over flow aspects in the hydrogen-enriched flame.

기호설명

P' : 압력 변동 (kPa)

X_{H2}: 연료의 수소몰분율

1. 서 론

최근 에너지 고갈과 환경오염의 심화가 세계적 이슈로 떠오르면서 점차 비용 효율적인 대체연료에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히 탄소원자를 포함하지 않으면서 단위질량당 발열량이 커서 주목 받는 대체에너지원인 수소와 기존의 탄화수소 계열의 연료를 혼합한 혼합연료를 가스터빈에 적용하여 향상된 연소 효율을 얻는데 많은 관심을 가지고 있는 실정이다. 요즘 이슈가 되고 있는 가스화 복합발전(IGCC)이나 유동층 연소에서도 이런 수소를 포함한 연료가 사용되는데 이러한 연료는 비용 효율적이면서도 넓은 범위의 발열량을 가지고 있어 가스 터빈에의 적용이 유리한 것이 사실이다. 이와 같이 청정에너지원인 순수 수소연료를 사용하기 전인 과도기적 시점에서 수소와 기존의 탄화수소 연료가 혼합된 혼합연료의 연소 특성에 대하여 살펴볼 필요성이 있다고 생각된다.

Anderson 등은 희박 예혼합 조건에서 프로판/공기 혼합기에 수소를 혼합함으로서 연소

† 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : kdh709@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8829 FAX : (042)869-8820
* 한국과학기술원 대학원 기계공학과
** 한국과학기술원 기계공학과

효율이 향상되고 희박 소화한계의 온도가 내려간다는 것을 밝혔다.[1] 또한 Morris 등은 희박 예혼합 조건에서 수소를 체적비율로 10%까지 혼합한 연료를 상업적 가스터빈 엔진에 적용하였으며[2] 동시에 수소혼합연료를 사용함에 따른 배출가스 특성과 연소 안정성에 관한 많은 연구가 진행되었다. Schefer 등은 수소혼합이 희박 소화한계를 확장시키고 희박 소화한계 근처의 운전조건에서 CO 배출을 감소시킴을 발견하였다. 또한 수소혼합된 메탄 화염이 강한 반응영역을 가진 짧은 화염임을 관찰하였다.[3] Wicksall 등은 수소가 혼합된 프로판과 메탄 예혼합화염의 압력 변동을 측정하여 수소혼합이 연소장을 불안정하게 할 수 있음을 보여 주었고 이와는 반대로 Barbosa 등은 수소를 2 차 연료로 분사함으로서 연소장의 불안정성을 제어할 수 있음을 보여 주었다.[4, 5] 그리고 수소 혼합된 메탄/공기 예혼합 화염의 화염 구조와 유동장의 상관관계에 대한 연구도 진행되었다.[6]

그러나 이러한 대부분의 연구는 최초 접근이 환경오염 규제에 따른 NOx 와 CO 의 저감이었으므로 연소 영역이 희박 소화한계 영역 근처이고 전반적인 연소 특성에 대하여 넓게 바라본 연구는 많지 않았다. 따라서 본 연구는 연소기의 효율적인 측면을 고려하여 운전 영역을 희박 소화한계에서 상향되게 정하였고 실제 가스터빈을 모사한 덤프형태의 모델 연소기를 사용하여 총유량과 단열화염온도가 동일한 조건에서 연료의 수소혼합비율을 바꿔가면서 압력변동 특성, 화염의 구조에 대하여 전반적으로 살펴보고 그 현상의 원인에 대하여 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에 사용된 연소기와 실험장치의 개략도이다. 연소기는 Hong[7] 등이 사용한 연소기를 바탕으로 스월러(swirler) 대신 둔체(bluff-body) 를 사용하여 실험하였다. 둔체를 사용한 이유는 2 차원적인 화염거동을 좀 더 명확히 볼 수 있으며 해석 데이터와의 비교, 분석하는데 용이하기 때문이다. 질량유량계(MFC)에 의해 공기, 상용프로판(LPG), 수소가 각각 조절되어 삼중관으로 구성된 버너로 공급되고, 특히 연료인 상용프로판과 수소는 그 혼합 정도를 높이기 위해 혼합용기(mixing chamber)를 거친 후 버너로 공급된다. 연료는 연료 분사구(main fuel injection holes)에서 분사되며, 공기와 혼합되는 혼합거리 285mm 를 거친 후 연소실내로 투입된다. 실험조건은 Table 1 에 나와 있듯이 단열 화염온도와 총유량이 동일한 조건에서 혼합연료의 수소몰분율을 0 ~ 0.5 까지 바꾸면서 실험하였다. 단열화염온도는 CHEMKIN 3.7 의 EQUIL 을 사용하여 각 수소몰분율에 따라 계산하였다.

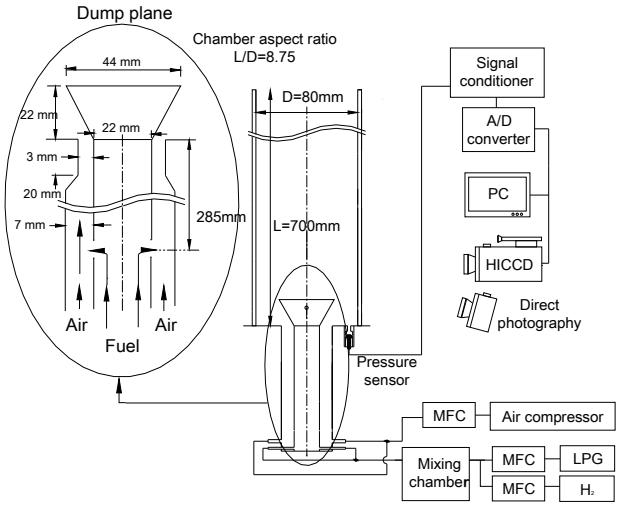


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

H_2	Adiabatic flame temp. (K)	Flow rate (l/min)				Total inlet velocity (m/s)
		C_3H_8	H_2	Air	Total	
0	1880	5.888	0	200	205.88	14.56
0.1	1880	5.78	0.64	199	205.42	14.53
0.2	1880	5.67	1.42	198	205.08	14.51
0.3	1880	5.52	2.37	197	204.89	14.49
0.4	1880	5.37	3.58	196	204.94	14.50
0.5	1880	5.15	5.15	195	205.31	14.52

연소실 내의 동압 변동(dynamic pressure fluctuation)은 연소기 덤프면의 냉각 자켓(water jacket) 내부에 설치된 압력 센서(piezoelectric pressure sensor, PCB Model 106B)를 통하여 측정하였고 이를 FFT 변환을 통해 주파수 분석을 하였다.

고속 카메라(HICCD camera, Kodak Ektapro, 4000 frames/sec)를 사용하여 연료의 수소몰분율의 변화에 따른 화염의 거동을 살펴보았다.

또한 ICCD(PI Instrument) 카메라를 사용하여 연료의 수소몰분율의 변화에 따른 OH 화학발광 신호를 측정하였다. Fig. 2 는 화염의 OH 화학발광 신호를 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 화염에서 발생한 OH 라디칼의 자발방출 신호는 WG305 와 UG11 필터를 통과하면서 280-305 nm 파장범위의 신호만이 통과하게 되고 이 신호를 512x512 픽셀의 ICCD 카메라를 이용하여 이미지를 획득하였다. 각 조건별로 한 주기동안의 이미지를 30 개씩 취득한 후 중첩하여 나타내었다.

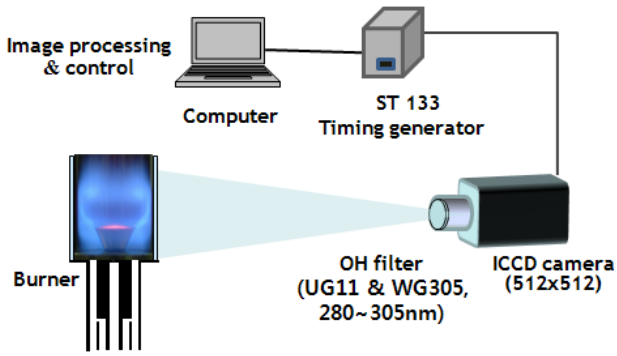


Fig. 2 Schematic diagram for chemiluminescence measurement system

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 안정화 선도

Fig. 3 은 공기의 유량을 200 l/min 로 일정하게 유지한 상태에서 연료의 수소몰분율 X_{H2}= 0, 0.1, 0.3, 0.5 로 변화시킴에 따른 화염형태를 관찰한 것으로 서로 다른 특성이 나타나는 모드(mode)에 따라 구분지어 표시하였다.[7] 아래의 결과에서 연료의 수소몰분율이 증가할수록 더 낮은 단열화염온도에서 각 모드에 해당하는 화염이 존재함을 볼 수 있다. 안정화 선도에서 볼 수 있듯이 각 모드의 화염이 나타나기 시작하는 단열화염온도가 수소를 혼합함에 따라 낮아짐을 볼 수 있다. 특히 Schefer[3] 등이 보였던 연료의 수소몰분율의 증가에 따른 희박 소화한계가 확장됨을 확인할 수 있었다.

본 실험에서 실험조건으로 잡은 화염형태는 모드 1 으로 난류 전단층(turbulent shear layer, Ⅲ)을 중심으로 바깥쪽 재순환영역(outer recirculation zone, I)과 둔체 위쪽에서 형성되는 안쪽 재순환영역(inner recirculation zone, II)으로 구분되어 화염이 안정적으로 존재함을 볼 수 있다.

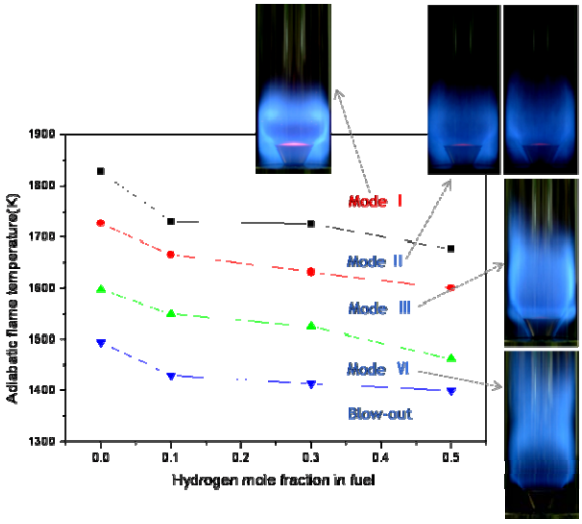


Fig. 3 Stability map

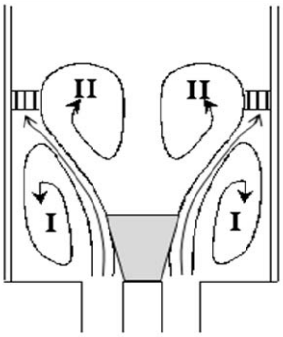


Fig. 4 Coherent flow structures of mode 1 : (I) outer recirculation zone (II) inner recirculation zone (Ⅲ) turbulent shear layer

3.2 연소실내의 압력변동

Fig. 5 는 연소실내의 압력변동을 나타낸 것이다. 실험은 연료의 수소몰분율 X_{H2}= 0 ~ 0.5 의 범위에서 이루어졌고 대표적인 2 가지 경우만 도시하였다. 본 연구의 연소기는 길이/직경의 비가 8.75 로 직경이 길이에 비해 아주 작으며 연소기의 한쪽은 덤프면에 의해 대부분 막혀있으며 다른 한쪽은 대기 중에 노출되어 있다. 따라서 음향학적으로 한쪽 끝이 막힌 파이프로 모사할 수 있으며, 이 경우에 1/4 파 모드(n=4)의

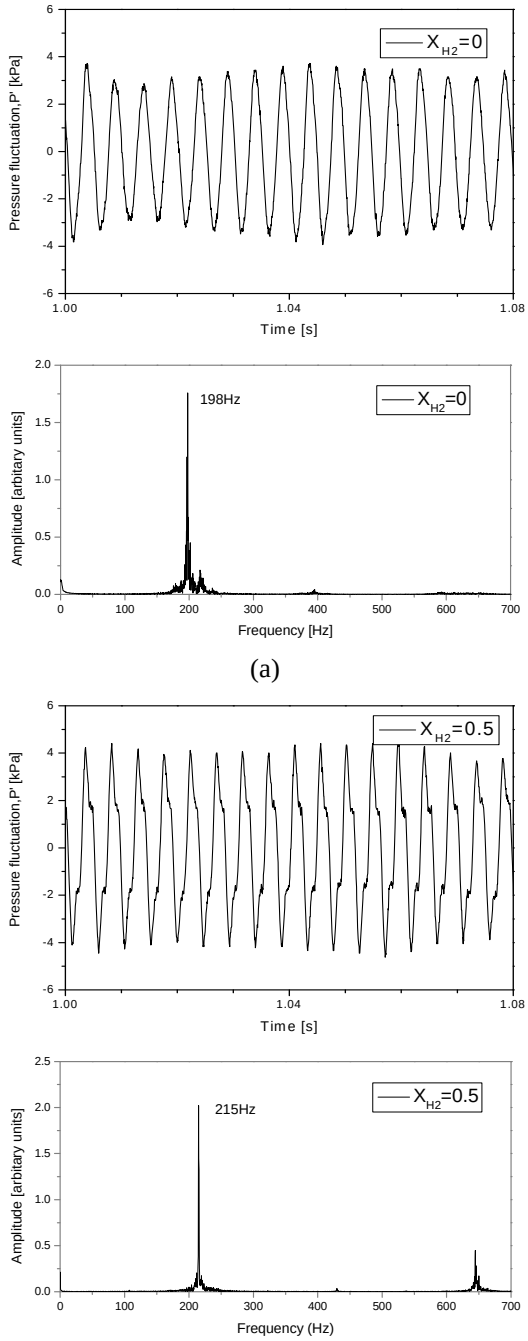


Fig. 5 Pressure signal in time and frequency domain: (a)X_{H2}=0 (b) X_{H2}=0.5

단일 길이방향 주파수는 다음 식과 같다.[8]

$$f(Hz) = \frac{1}{n\int_0^l \frac{dx}{\sqrt{\gamma RT(x)}}}$$

여기서, f 는 주파수(Hz), l 은 연소기 길이(m), n 은 모드값, γ 는 연소기내 공기의 비열비, R 은 기체상수(J/kg · K), $T(x)$ 는 연소기내 공기의 축 방향의 온도(K)이다.

l 은 700 mm 이고, 연소기내 공기의 비열비(γ)와 평균 온도를 각각 1.34, 950 K 라고 가정하고 위의 식에 적용하면 관의 공명주파수는 215 Hz 가 된다. 이 값은 평균온도를 가정한 것을 고려하면 실제 FFT 분석을 통해 나온 값과 비교적 잘 일치한다.

Fig. 6 은 연료의 수소몰분율의 증가에 따른 압력 신호의 변화를 나타낸 것이다. 수소몰분율의 증가에 따라 주파수가 198 Hz 에서 215 Hz 까지 증가함을 볼 수 있다. 이는 뒤에서 언급되겠지만 수소혼합에 따라 화염의 주반응 영역이 연소기 상류로 이동하게 되고 이로 인해 연소기내의 온도분포가 달라지게 되기 때문이다. 위의 식에서 나타내었듯이 관의 공명주파수를 결정하는 것은 온도에 의해 결정되어지는 연소로 내부의 음속이다. 수소 혼합비율의 증가에 따라 화염의 주반응 영역이 상류로 이동하게 되고 이로 인해 연소기에서 고온의 영역이 차지하는 비율이 많아져 주파수가 증가하게 되는 것으로 생각된다. 이는 차후에 연소기내의 축 방향 온도 분포를 수소몰분율의 증가에 따라 측정해 봄으로써 확인할 수 있을 것이다. 또한 수소 혼합비율의 증가에 따라 압력 변동 신호의 진폭이 증가하는 경향을 볼 수 있었고 연료의 수소몰분율이 0.4 가 되는 시점에서부터 주파수가 445 Hz 의 3 차 longitudinal mode 가 나타남을 볼 수 있다. 이 것 또한 연료의 수소혼합비율의 증가에 따라 화염의 주반응 영역이 상류로 이동하게 되어 열발생 위치가 바뀜에 의한 현상으로 생각된다.[9]

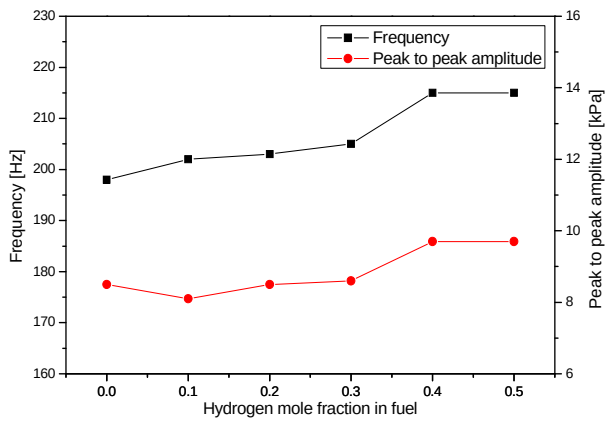
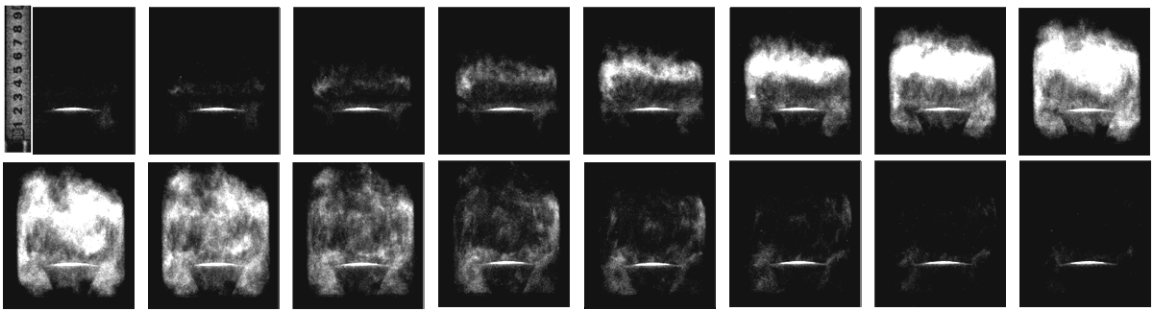
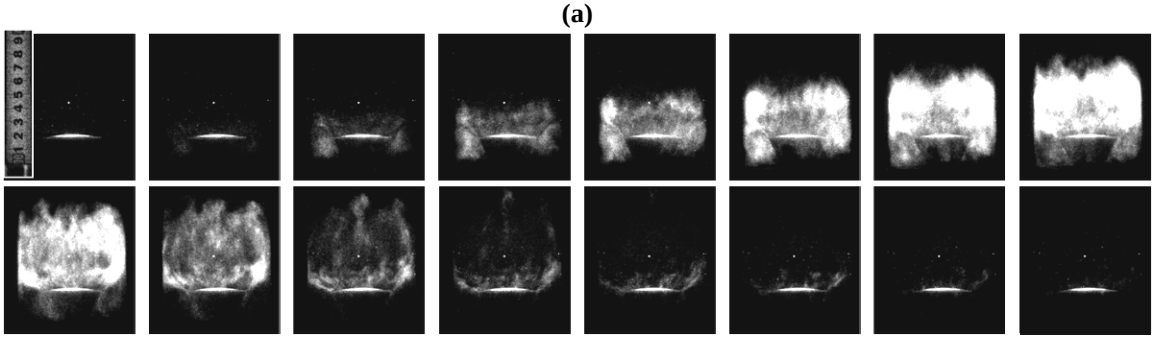


Fig 6 Pressure signal according to hydrogen enrichment



(a)



(b)

Fig. 7 Flame images [4000frame/sec] of one cycle for Q=205 l/min and T_{ad}=1880 K: (a) X_{H2}=0 (b) X_{H2}=0.5

3.3 화염의 구조

3.3.1 고속 카메라 이미지

연료에 수소를 혼합함에 따른 화염의 구조와 거동에 대하여 살펴보기 위하여 고속 카메라로 초당 4000 프레임의 이미지를 촬영하였다. 실험은 총유량을 205 l/min, 단열화염온도를 1880 K 로 동일하게 한 상태에서 연료의 수소몰분율의 증가에 따른 화염의 이미지를 촬영하였다. 고속 카메라로 촬영한 이미지를 통해 화염이 난류 전단층을 중심으로 바깥쪽 재순환영역과 둔체 위쪽에서 형성되는 안쪽 재순환영역으로 구분되어 존재함을 확인할 수 있다. 화염이 존재하는 영역은 난류전단층을 중심으로 안쪽과 바깥쪽 재순환영역으로 수소혼합의 유무에 따라 비슷해 보이지만 시간에 따른 국부 지역의 연소에는 차이가 있음을 Fig. 7 을 통해 알 수 있다. 연료의 수소몰분율이 0 인 (a)의 경우는 화염이 안쪽 재순환영역에서 먼저 발생하여 그 후에 난류전단층과 바깥쪽 재순환영역으로 화염이 전파해 나감을 볼 수 있다. 이에 반해 연료의 수소몰분율이 0.5 인 (b)의 경우는 화염이 바깥쪽 재순환영역과 난류 전단층에서 먼저 발생하여 전파해 나감을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 높은 수소의 화학반응속도 때문인 것으로 판단된다. 연료가 순수 상용프로판일 경우는 혼합기의 공급속도보다 상대적으로 느린 프로판의 화학반응속도로 혼합기가 농후하게 분포하게 되는 안쪽 재순환영역에서 연소가 대부분 발생하게 되지만 수소가 혼합됨에 따라 상대적으로 빠른 수소의 화학반응속도의 영향으로 좀 더 상류의 난류전단층에서 연소가 발생하는 것으로 생각된다.

3.3. OH 자발광 이미지

연료의 수소혼합비율에 따른 화염의 주반응 영역의 위치를 살펴보기 위하여 OH 화학발광 신호를 ICCD 카메라로 취득하였다. Fig. 6 은 총유량을 205 l/min, 단열화염온도를 1880 K 로 동일하게 한 상태에서 연료의 수소몰분율을 0 에 0.5 까지 증가시키면서 OH 화학발광 이미지를 측정한 것이다. 화염의 주반응 영역의 위치를 알아보는데 초점을 맞췄기 때문에 실험은 압력 신호의 한 주기에 해당하는 시간 동안의 이미지를 30 장 중첩하여 나타내었다.

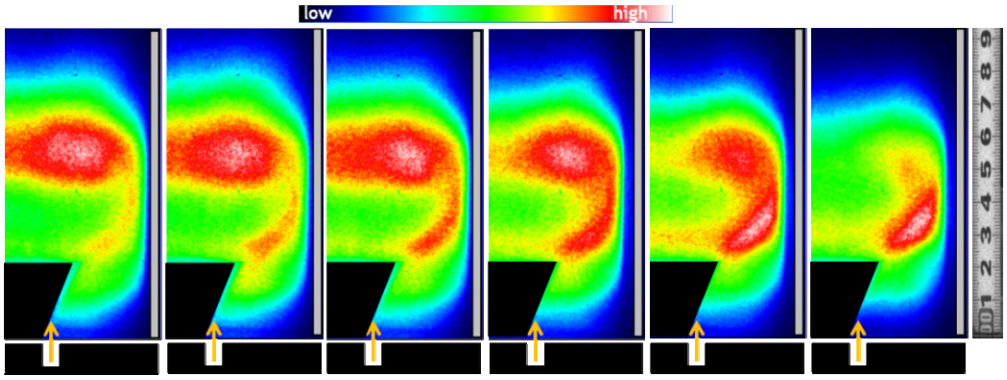


Fig. 6 OH chemiluminescence images of one cycle for Q=205 l/m and T_{ad}=1880 K: (a) X_{H2}=0 (b) X_{H2}=0.1 (c) X_{H2}=0.2 (d) X_{H2}=0.3 (e) X_{H2}=0.4 (f) X_{H2}=0.5

Fig. 6 의 (a)에서 볼 수 있듯이 연료에 수소가 혼합되지 않았을 경우, 즉 연료가 순수 상용프로판일 때는 화염의 주반응 영역이 둔체 위쪽의 안쪽 재순환영역이었다가 수소 혼합비율을 높임에 따라 난류 전단층으로 옮겨감을 확인할 수 있다. (f)를 보면 수소몰분율 X_{H2}= 0.5 일 경우 주반응이 난류 전단층 영역에서 일어남을 확인할 수 있다

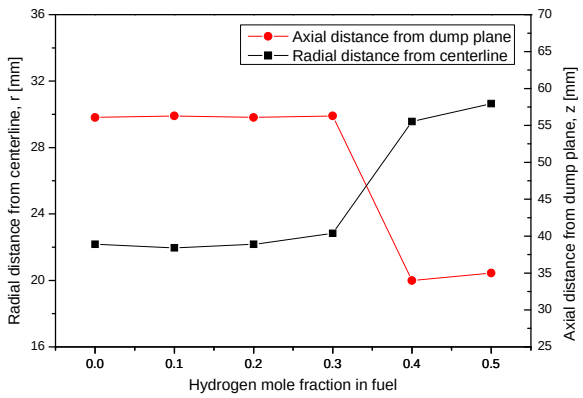


Fig. 7 The location of Maximum OH chemiluminescence intensity according to hydrogen enrichment

Fig. 7 은 최대 OH 화학발광 신호가 나타나는 위치를 연료의 수소몰분율의 증가에 따라서 나타낸 것이다. 연료의 수소몰분율이 0 ~ 0.3 의 범위에서는 최대 OH 화학발광 강도가 나타나는 위치가 거의 변함이 없다가 수소몰분율이 0.4 일 때부터 급격하게 바뀜을 볼 수 있다. 다시 말해, 주반응 영역이 r=22mm, z=56mm 인 안쪽 재순환 영역에서 r=30mm, z=34mm 인 난류 전단층 영역으로 바뀌게 되었다. 이 또한 위에서 설명하였듯이 상대적으로 반응속도가 빠른 수소성분의 혼합에 따른 영향이라고 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 가스터빈을 모사한 실험실 스케일의 덤프 연소기를 제작하여 수소혼합에 따른 연소특성에 대하여 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 수소혼합비율이 증가할수록 더 낮은 단열화염온도에서 각 모드에 해당하는 화염이 존재함을 확인하였다. 특히 연료의 수소몰분율의 증가에 따라 희박 소화한계가 확장됨을 확인하였다.

(2) 연소기내의 압력 변동 신호의 주파수와 진폭이 수소혼합비율의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 수소혼합비율의 증가에 따라 화염의 주반응 영역이 상류로 이동하여 열발생 위치가 변했고 그로 인해 온도분포가 달라졌기 때문으로 생각된다.

(3) 수소혼합의 증가에 따라 화염의 주반응 영역이 안쪽 재순환영역에서 난류 전단층영역으로 옮겨감을 확인하였다. 또한 화염의 초기 발생위치의 변화도 확인하였다. 연료가 순수 상용프로판일 경우는 혼합기의 공급속도보다

상대적으로 느린 프로판의 화학반응속도로 혼합기가 농후하게 분포하게 되는 안쪽 재순환영역에서 연소가 대부분 발생하게 되지만 수소가 혼합됨에 따라 상대적으로 빠른 수소의 화학반응속도로 영향으로 좀 더 상류의 난류전단층에서 연소가 발생하는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 BK21 의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) D. N. Anderson, 1975, “Effect of Hydrogen Injection on Stability and Emissions of an Experimental Premixed Pre-Vaporized Propane Burner,” NASA TM X-3301 National Technical Information Service, Springfield, VA.

(2) J. D. Morris, R. A. Symonds, F. L. Ballard and A. Banti, 1998, “Combustion Aspects of Application of Hydrogen and Natural Gas Fuel Mixtures to MS9001E DLN-1 Gas Turbines at Elsta Plant,” ASME paper 98-GT-359.

(3) R. W. Schefer, D. M. Wicksall and A. K. Agrawal, 2002, “Combustion of Hydrogen-Enriched Methane in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Burner,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 843-850.

(4) D. M. Wicksall, A. K. Agrawal, 2007, “Acoustics Measurements in a Lean Premixed Combustor Operated on Hydrogen/Hydrocarbon Fuel Mixtures,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, pp. 1103-1112.

(5) Severine Barbosa, Marta de La Cruz Garcia, Sebastien Ducruix, Bernard Labegorre and Francois Lacas, 2007, “Control of Combustion Instabilities by Local Injection of Hydrogen,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31 , pp. 3207-3214.

(6) D. M. Wicksall, A. K. Agrawal, R. W. Schefer and J. O. Keller, 2005, “The Interaction of Flame and Flow in a Lean Premixed Swirl-Stabilized Combustor Operated on H_2/CH_4/air,” Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, pp. 2875-2883.

(7) J. G. Hong, M. C. Lee, U. D. Lee, K. C. Oh and H. D. Shin, 2005, “An Experimental Study on the Instability of Combustion in a Dump Combustor with Respect to Fuel and Air Mixing and Flow Conditions,” Transaction of KSME (B), Vol. 29, No.8, pp.963-970.

(8) E. C. Fernandes and M. V. Heitor, 1996, “Unsteady Flame and the Rayleigh Criterion,” Kluwer Academic Publishers.

(9) J. A. Carvalho Jr., M. A. Ferreira, C. Bressan and J. L. G. Ferrrira, 1989, “Definition of Heater Location to Drive Maximum Amplitude Acoustic Oscillations in a Rijke Tube,” Combustion and Flame, Vol. 76, pp. 17-27.

(10) Stephen R. Turns, 2006, “An Introduction to Combustion,” McGraw-Hill International Editions.