

## 이중 연료 분사구조를 갖는 희박-예혼합 버너의 연소특성 연구<sup>§</sup>

장재환\*·조주형\*\*†·김한석\*\*·이상민\*\*·김민국\*\*·안국영\*\*

\* 과학기술연합대학원대학교, \*\* 한국기계연구원

### Study on Lean-Premixed Combustion Characteristics of Dual-Stage Burner

Jae Hwan Jang\*, Ju Hyeong Cho\*\*†, Han Seok Kim\*\*, Sang Min Lee\*\*, Min Kuk Kim\*\* and Kook Young Ahn\*\*

\* School of Environmental Energy and Mechanical Engineering, University of Science and Technology.,  
\*\* Korea Institute of Machinery and Materials.

(Received May 15, 2012 ; Revised November 20, 2012 ; Accepted November 22, 2012)

**Key Words:** Lean Premixed Combustor(희박 예혼합 연소기), Axial Swirl(축방향 스월), NOx Emission(NOx 배출), CO Emission(CO 배출), Staged Fuel Injection(단계별 연료 분사)

**초록:** 본 연구에서는 가스터빈 연소기에 적용하기 위한 예혼합 스월버너의 배기가스 및 화염안정성 최적화를 위하여 버너의 구조변경에 따른 연소특성을 실험적으로 분석하였다. 버너의 연료분사구조에 따른 배기가스 배출 특성을 파악하고자 단일연료분사구조와 이중연료분사구조를 갖는 예혼합 버너의 연소특성을 비교 분석하였으며 이중연료분사구조 적용 시 연료/공기 혼합특성이 향상되어 CO와 NOx의 배출농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 노즐출구와 라이너의 지름 비(confined ratio)에 따른 연소부하 및 배기가스 특성을 분석한 결과 confined ratio 감소 시 연소부하 감소로 인해 NOx 배출농도가 감소되었으며, 체류시간의 증가로 인해 CO의 산화 반응이 증가하여 CO 배출농도가 감소하였다. 노즐분출속도는 30 m/s에서 배기가스특성이 우수하며, 속도 증가(40 m/s) 시 배기가스특성이 저하되고 속도 감소(20 m/s) 시 화염안정성이 저하되었다.

**Abstract:** This study aims to experimentally investigate the combustion characteristics of a lean premixed swirl-stabilized burner with dual-stage fuel injection arrays. The results show that a variation in the fuel distribution to fuel stages 1 (upstream) and 2 (downstream) produces a noticeable change in the NOx and CO emissions. Reducing the confined ratio, defined as the ratio of the nozzle exit diameter to the liner diameter, may reduce NOx and CO emissions owing to reduced combustion loading and longer residence time, respectively. A nozzle exit velocity of 30 m/s shows the optimum characteristics in terms of NOx and CO emissions and flame stability: increasing or decreasing the nozzle exit velocity leads to a degradation in emissions or flame stability, respectively.

- 기호설명 -

$d$  : 선회기 내경

$d_j$  : 연료 분사구 직경

$d_h$  : 선회기 외경

$J$  : 운동량속 비

$S$  : 선회수

$U_a$  : 공기 속도

$U_f$  : 연료 분사 속도

$X$  : 축방향 거리

$Y$  : 연료 관통거리

$\rho_a$  : 공기밀도

$\rho_f$  : 연료밀도

$\theta$  : 선회각

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 열공학부문 춘계학술대회(2012. 5. 23.-26., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, antocho@kimm.re.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

### 1. 서론

최근 들어 날로 심각해지는 공해문제와 환경 보

호의 필요성이 대두됨에 따라 대기오염 배출물을 줄이고 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 국내외적으로 확대되어 가고 있다. 국내의 경우 대기 오염물질을 해결하기 위한 동력원으로 저공해 가스터빈 엔진을 이용한 열병합 발전 시스템개발에 초점을 맞추고 있다.<sup>(1)</sup> 대기오염물질을 저감하는 방법으로는 연료와 과잉의 공기를 가연 한계 이상으로 예혼합하여 공급함으로써 화염온도를 감소시켜 Thermal NOx를 저감시키는 희박 예혼합연소(lean-premixed combustion), 연소에 필요한 공기량보다 적은 공기량을 주연소영역으로 공급하여 연료과농상태로 연소를 시켜 화염온도를 저하시키고 후류쪽에 공기를 과잉공급하여 잔존하는 미연가스 및 CO를 연소시키고 화염의 고온영역이 되는 부분을 최소화함으로써 NOx를 저감하는 과농-희박 연소(Rich-Quick quench- Lean burn combustion), 촉매를 사용하여 보다 낮은 온도영역에서 연소를 가능하게 하여 NOx를 저감시키는 촉매연소(catalytic combustion), 그 외에 배가스 재순환(flue gas recirculation), 물분사법 등 다양한 방법이 알려져 있다.<sup>(2-6)</sup> 이러한 여러 가지 저 NOx형 연소기 설계 방법 가운데 예혼합 희박연소기술은 현재까지 가장 적합한 기술로 평가되고 있다. 하지만 희박 연소에 따른 화염의 불안정성, 역화(flashback), 부하에 따른 제어 등의 문제점<sup>(6,7)</sup>이 발생할 수 있으므로 이를 해결하기 위한 연구개발이 지속적으로 수행되고 있다.

본 연구에서는 실제 역류형 가스터빈 연소기에 장착 가능한 저 배기형(low-emissions) 연소기 개발을 위해 lab-scale의 예혼합 버너를 설계/제작하여 연소특성을 파악하고자 한다. 특히 예혼합 영

역에서의 이중 연료분사구조에 따른 연료분배와 연소용공기와의 혼합도, 노즐출구의 직경과 라이너의 직경에 대한 비, 노즐출구의 분사속도에 따른 화염안정성 및 역화를 고려하여 성능실험을 수행하였다. 그 중 배가스 특성과 화염안정성에 가장 적합한 예혼합기를 선정하고 주연소영역의 당량비에 따른 배가스 및 화염특성을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 예혼합버너 설계

희박 예혼합 버너의 설계조건을 도출하기 위해 연소기에 대한 기본설계안<sup>(8-10)</sup> 및 자체 설계용 프로그램(KACOM 등)을 이용하였으며 200 kW급 가스터빈 사이클 해석결과를 바탕으로 예혼합 연소 실험 조건을 Table 1과 같이 도출하였다. 예혼합 버너 출구 유속은 압력손실과 버너의 출구 면적을 고려하여 30m/s로 결정하였으며 단열화염온도 1900K를 만족하는 화학적 당량비(equivalence ratio,  $\Phi$ ) 0.73을 기준으로 연료/공기 유량을 결정하였다. 예혼합 버너의 형상은 Fig. 1과 같이 기존의 단일(single-stage) 연료분사구조(a형상)<sup>(11,12)</sup>와 이중(dual-stage) 연료분사구조(b형상)를 이용하여 연료/공기가 예혼합 되는 구조로 설계하여 예혼합 버너의 혼합특성을 비교분석하였다. 예혼합기 내부의 축방향으로 공급되는 연소공기와 연료분사구를 통해 수직으로 분사되는 연료의 혼합특성을 파악하기 위하여 아래의 식 (1)을 적용하여 관통거리(penetration distance)를 예측하였다.<sup>(1)</sup>

$$Y/d_j = 0.82J^{0.5}(X/d_j) \quad (1)$$

$$J = (\rho_f U_f^2) / (\rho_a U_a^2)$$

Table 1 Experimental conditions. (design point)

Parameters	Unit	Value	Remarks
Inlet pressure	kPa	101.3	
Inlet air temperature	K	300	
Fuel mass flow rate	lpm	43.8	관통거리고려
LHV (methane)	kJ/kg	50016	
Air mass flowrate	kg/s	0.01359	Nozzle exit velocity(30m/s)
(A/F) <sub>st</sub>	kg/kg	16.97	
A/F	kg/kg	23.3	
Equivalence ratio( $\Phi$ )	-	0.73	

Table 2 Key parameters for a premixed burner

Case No.		1	2	3
Fuel distribution	Fuel stage 1	0 %	50 %	80 %
	Fuel stage 2	100 %	50 %	20 %
Liner size	diameter(mm)	75	75(55)	75
	length(mm)	250	250	250
Swirl angle	degree	45	45	45

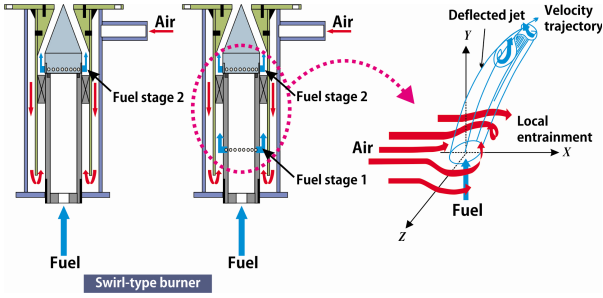


Fig. 1 Schematic of fuel penetration into air stream by normal injection

연료와 공기의 예혼합 특성을 최적화하기 위하여 식 (1)의 관통거리를 바탕으로 stage 1, 2의 연료 분사위치를 결정하였으며 각 stage에 공급되는 연료분배량에 따라 case 1, 2, 3의 세 경우로 나누어 실험을 수행하였다. (Table 2 참조) 스윙 예혼합 버너에 장착되는 선회기(swirler)는 stage 1과 stage 2의 연료분사구 사이에 위치한다. 선회각은 선행연구를 통하여 45도로 선정하였으며 선회수 (swirl number, S)는 식 (2)를 이용하여 45도인 경우  $S=0.816$ 이다.

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

### 2.2 실험장치

메탄(CH<sub>4</sub> : 99.95%)과 건공기(dry air : 79% N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub>)를 이용한 예혼합 연소 실험장치는 Fig. 1에서의 예혼합기, 연료 및 공기 공급장치, 그리고 가시화 장치 및 배가스 측정장치로 구성되어 있다. 연료 및 공기 공급장치는 Coriolis 유량계 (Micro-motion)를 사용하였으며, MFC(mass flow controller)를 이용하여 유량 조절을 하여 연소기에 공급하였다. 연소실의 초기점화는 토치를 이용하였다. 배가스의 농도측정을 위해 삼중관 구조의 수냉식포집관(water-cooled sampling probe)을 연소실 출구에 설치하였으며, 포집된 배가스는 연속측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였다.

### 2.3 실험방법

Fig. 1의 스윙 예혼합버너와 Fig. 2의 주연소영역의 실험 장치를 이용해 Table 1의 설계조건을

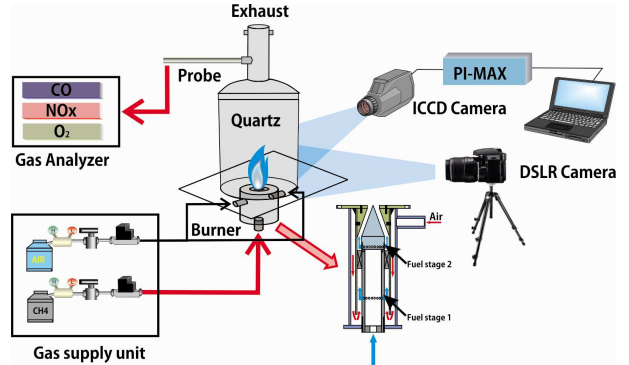


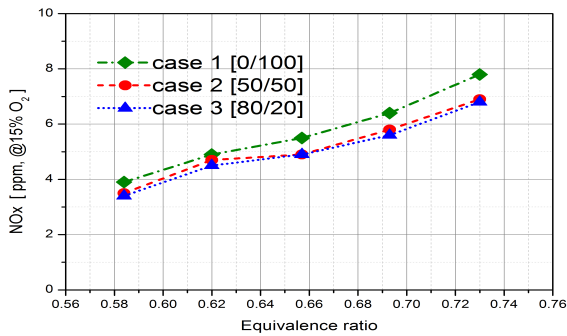
Fig. 2 Experimental apparatus with a premixed flame combustor

기준으로 소염이 발생되지 않는 당량비 범위에서 실험을 수행하였다. 주 연소영역으로 공급되는 상온(298K), 상압(대기압)의 연소용 공기와 연료량을 조절하여 당량비 변화에 대한 CO와 NO<sub>x</sub>의 배가스 농도를 측정하고 O<sub>2</sub> 15% 기준으로 환산하였다. 연소실의 부하에 따른 화염특성을 파악하기 위해 노즐출구의 직경과 라이너의 직경에 대한 비를 고려하여 라이너에 해당하는 석영관(quartz)의 직경을 55mm와 75mm(높이 250mm)로 하여 비교실험을 수행하였다. 화염구조 및 OH 자발광의 분포를 파악하기 위해 307nm 필터(narrow band interference filter)를 장착한 ICCD(intensified charge-coupled device) 카메라를 사용하고 모든 실험조건에서 증폭 80, 노출 100ms로 촬영하여 100 프레임에 대한 평균값을 이용하였다. 측정된 OH의 이미지는 측정방향으로 적분되어 나오는 신호이므로 실제 반경방향의 분포를 아벨 변환(Abel transformation)하여 화염의 단면 정보를 파악하였다.

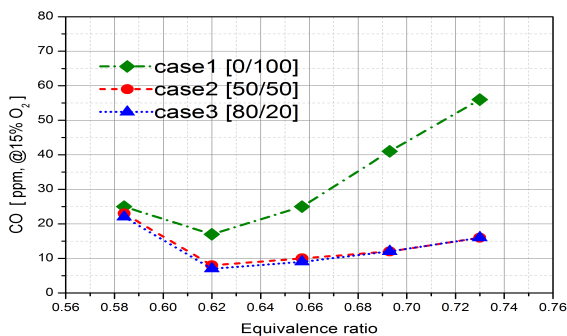
## 3. 실험 결과

### 3.1 연료분사구조에 따른 배가스 특성

연료분사구조에 따른 혼합특성 및 배가스 특성을 파악하기 위하여 단일 및 이중 연료분사구조를 이용하여 case 1, 2, 3의 연료분배조건(Table 2 참조)에 대한 배가스 분석을 수행한 결과 NO<sub>x</sub>와 CO의 배출 특성을 Fig. 3에 나타내었다. NO<sub>x</sub>의 배출특성을 살펴 보면 Fig. 3(b)에 보는 바와 같이 이중연료분배를 적용한 case 2와 case 3의 경우가 단일연료분배를 적용한 case 1보다 NO<sub>x</sub> 배출량이 낮음을 볼 수 있다. 이는 상류(stage 1)에



(a) NOx

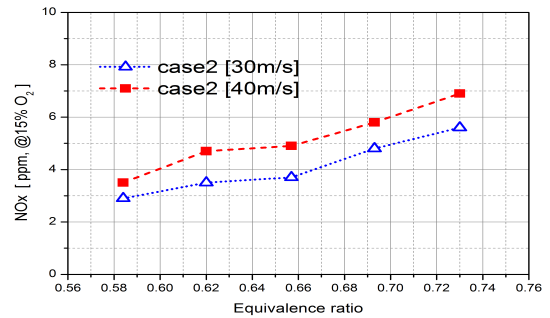


(b) CO

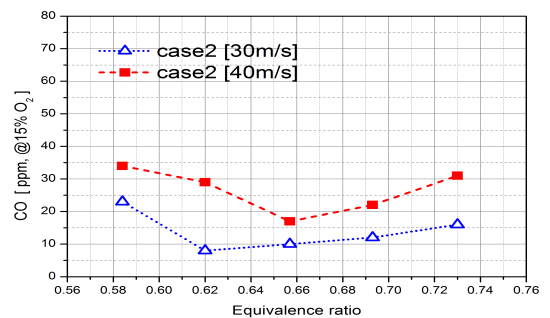
**Fig. 3** Effect of staged fuel injection on NOx and CO emissions

연료 분배를 하는 경우(case 2, case 3)에 노즐출구까지의 예혼합 거리가 증가하여 상류에 연료분배를 하지 않는 case 1의 경우와 비교하여 메탄/공기의 혼합특성이 향상되고 이로 인하여 주 연소영역에서의 국부적인 고온부(hot spot)가 감소하여 Thermal NOx 배출량이 감소되기 때문으로 사료된다. CO배출특성도 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 이중연료분배를 적용한 case 2와 case 3의 경우가 단일연료분배를 적용한 case 1보다 CO 배출량이 낮음을 볼 수 있다. 이 경우에도 이중연료분배를 적용한 case 2와 case 3이 case 1의 경우와 비교하여 혼합특성이 향상되기 때문에 완전연소에 보다 접근하여 주연소영역의 CO 배출량이 감소하는 것으로 예상된다.

이중연료분배의 경우를 비교하면 case 2와 case 3의 CO 및 NOx 배출특성이 유사함을 볼 수 있으며 이는 상류(stage 1)에 50%의 연료만 분배하여도 예혼합 특성이 충분히 향상되어 배가스 배출량이 감소되고 50% 초과로 공급하여도 배출량 감소에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. stage 1에 공급가능한 연료분배량 결정 시 고려해야 할 점은 stage 1에 연료량이 증가하는 경우에



(a) NOx



(b) CO

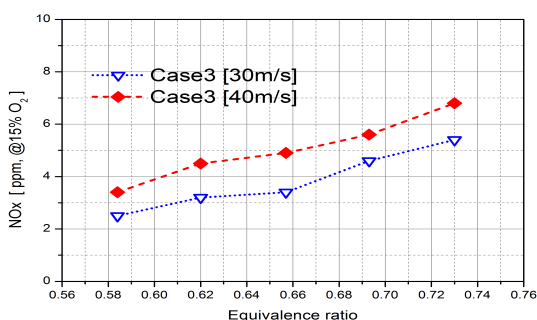
**Fig. 4** Effect of nozzle exit velocity on CO and NOx emissions (case 2)

자발화(auto-ignition) 가능성이 높아진다는 점이다. 열교환기(recuperator)를 장착하는 역류형 가스터빈 연소기의 경우에 연소기입구 공기온도가 900K 이상에 도달하며 이 때 stage 1에 50% 이상의 연료가 분배되면 메탄/공기의 가연범위에 들어오게 된다. (상온공기 공급 시 가연하한계 당량비인 0.46<sup>(13)</sup>에 해당하는 단열화염온도를 기준으로 함.)

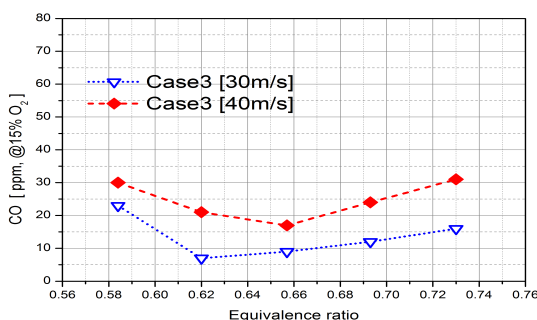
본 연구에서는 이러한 자발화 가능성을 최소화하기 위하여 상류(stage 1)에 50%의 연료분배를 적용한 case 2 노즐을 선정하였다.

### 3.2 예혼합기의 분사유속에 따른 배가스 특성

Fig. 4와 Fig. 5에서는 배가스 특성이 우수한 이중연료 분사구를 갖는 예혼합 버너를 이용하여 노즐출구유속 변화에 대한 배가스 및 화염특성을 파악하였다. 라이너 직경 75 mm 와 버너노즐 선회각 45도(S=0.816)를 이용하여 노즐 출구속도 30m/s(설계조건)와 40 m/s에 대한 배가스 특성을 비교하였다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과에서 보는 바와 같이 설계조건보다 노즐 분사유속을 증가시켰을 때 배가스 특성이 저하된다. 즉 분사유속의 증가로 CO의 체류시간이 짧아짐(3.4절 참조)에 따라 CO의 산화 반응이 감소하여 CO배출량이



(a) NOx



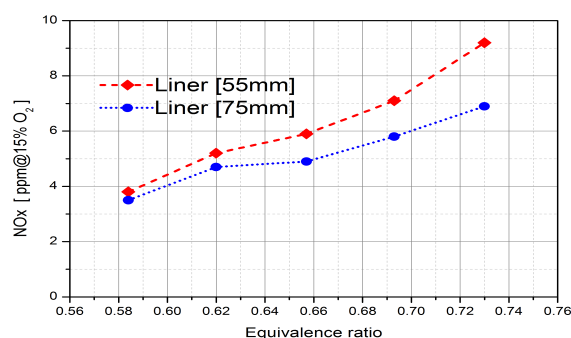
(b) CO

Fig. 5 Effect of nozzle exit velocity on NOx and CO emissions (case 3)

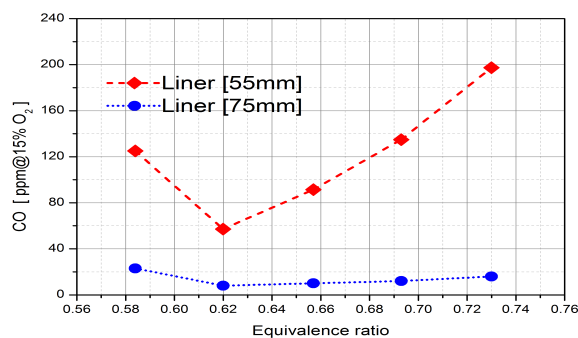
증가하고, NOx의 경우에는 체류시간의 영향보다는 연소부하의 증가로 상대적인 열손실이 감소하여 NOx 배출이 증가되는 것으로 사료된다.

### 3.3 Liner size에 대한 배가스 특성

본 절에서는 3.1절에서 선정된 case 2 예혼합버너를 이용하여 라이너의 직경에 따른 배가스 특성을 확인하고자 한다. 본 연구의 예혼합 버너가 장착될 환형 연소기는 크기(직경)에 대한 제약조건이 있으므로 이를 고려하여 가능한 라이너의 최대 직경을 예상한 결과 약 75 mm임을 확인하였고 이 보다 작은 직경 55mm를 포함하여 두 가지 라이너 직경에 대한 연소실험을 수행하였다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 주연소영역의 라이너 직경이 작은 경우(55mm)에 NOx 배출량이 증가하는데 이는 연소실 부피 감소로 연소부하가 증가하기 때문이다. CO 배출 특성을 살펴보면 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 라이너 단면적 감소에 의한 평균유속의 증가로 체류시간(residence time)이 감소하고 또한 라이너 벽면까지의 거리 감소로 벽면에서의 CO quenching이 증가하여 결과적으로 CO 배출량이 증가함을 볼 수 있다. 반면, 라이너직경이 증가한 경우(75mm 사용) 연소



(a) NOx



(b) CO

Fig. 6 Effect of combustion liner diameter on NOx and CO emissions.(case 2)

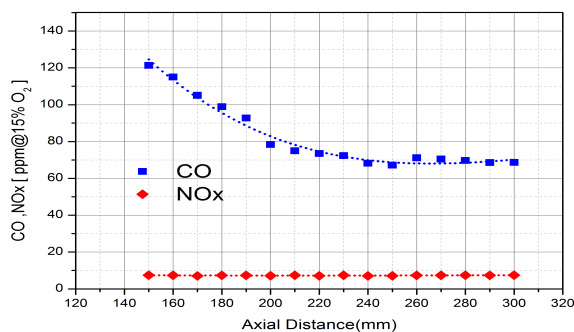


Fig. 7 Variations of CO, NOx emissions along the axial distance downstream of the nozzle exit

부하의 감소로 NOx가 감소되고 체류시간(residence time)의 증가로 인해 CO의 산화 반응시간이 증가하여 CO의 배출량이 감소함을 볼 수 있다. 노즐출구직경과 라이너의 직경비를 confined ratio로 정의하면 55mm와 75mm의 라이너 직경은 confined ratio로 0.4와 0.3 정도에 해당하며 앞의 결과로부터 배가스 배출특성 측면에서 confined ratio = 0.3 이 더 우수함을 확인하였다.

연소기의 축방향에 따른 CO의 산화반응정도를 정량적으로 파악하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 라이너 직경 75mm를 이용하여 주연소실

의 축 방향에 따른 CO 농도를 측정된 결과, 화염대에서 생성된 CO가 축방향 거리로 약 220mm까지 감소함을 볼 수 있는데, 이영역에서는 고온연소가스의 재순환(recirculation)으로 인해 CO 산화반응이 용이한 것으로 사료된다. 노즐출구로부터 약 200mm 이상부터는 CO 산화반응이 미미하여 CO 농도분포가 거의 일정함을 볼 수 있는데, 이 지점에 연소가스 냉각용 희석공기를 공급하기 위한 희석 공기공의 위치를 정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

### 3.4 예혼합기 화염특성

연소에서의 OH 자발광(chemiluminescence)은 화염의 구조 및 연소반응영역의 전체적인 열발생율을 나타낼 수 있는 지표로 사용하고 있으며, 특정파장의 빛만 투과하는 OH 필터(307nm)를 ICCD 카메라에 장착하여 화염단면에서의 OH radical에 대한 분포를 알아보려고 한다. 예혼합버너 case 2를 이용하여 설계 당량비조건에서 노즐출구 분사속도에 대한 화염의 OH 이미지를 측정하고 중심축을 기준으로 한 좌우 이미지에 대하여 아벨변환(Abel transformation)한 화염단면 이미지를 분석하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a),(b)에서 보는 바와 같이 노즐출구기준 45도 선회방향에서 연소영역이 집중됨을 볼 수 있으며 중심부의 재순환영역에서는 화염강도가 감소함을 볼 수 있다. 특히 측정된(적분된) OH 이미지와는 달리 아벨변환된 화염단면 이미지를 살펴보면 OH radical이 벽면에 집중되어 있어 벽면근처에서도 반응이 활발히 일어나고 있으며 이는 벽면에서의 CO quenching특성과도 밀접한 관련이 있을 것으로 예상된다. 물론 환형연소기의 경우에 라이너 벽면온도는 압축된 고온공기의 영향으로 일정온도가 상승하며 이로 인한 CO quenching 특성은 추후 분석할 예정이다. 노즐분사속도 증가(40 m/s) 시에 화염특성을 살펴보면 30 m/s의 경우와 비교하여 화염대칭성이 저하되고 화염길이가 다소 증가함을 확인 할 수 있다. 두 경우에 반응영역의 체류시간을 비교해 보면 30 m/s 와 40 m/s 인 경우 화염길이가 각각 55mm와 65mm 정도이므로 “평균체류시간 = 화염길이 / 평균속도”로 정의하면 체류시간 비는 약 0.89 ( $= (65/40) / (55/30)$ )로 노즐분사속도 증가(40 m/s) 시에 화염길이는 증가하는 반면 평균체류시간은 오히려 감소함을

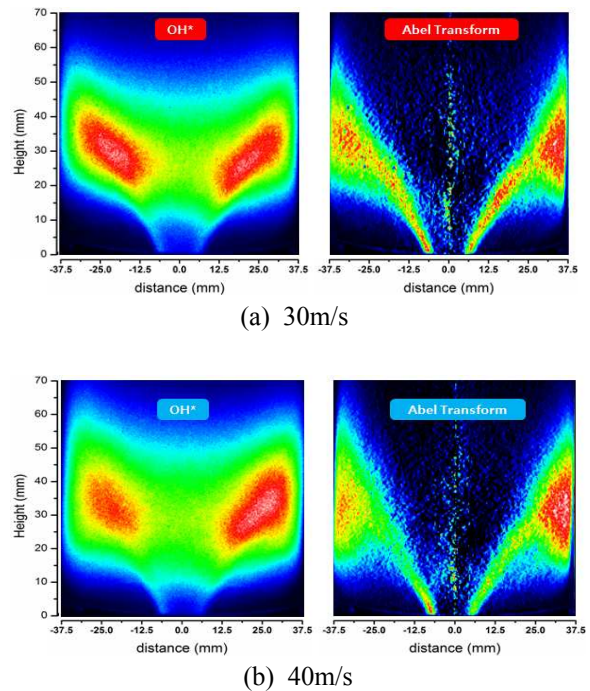


Fig. 8 Flame characteristics of swirl-stabilized burner(case 2)

알 수 있다. 노즐분사속도가 더욱 감소하는 경우 (20 m/s)에는 화염역화로 인한 화염불안정현상이 관찰되어 안정된 화염형상을 측정할 수 없었으며 화염기저부(flame root)가 버너노즐 출구면의 안팎으로 주기적(~20 Hz)으로 진동함을 확인하였다. 이는 노즐분출속도가 감소하여 화염이 노즐내부로 들어가게 되면 공간이 좁은 노즐내부에서 연소반응에 의한 가스팽창으로 노즐분출속도가 순간적으로 증가하여 화염을 노즐출구 밖으로 밀어내고 연소실에서 다시 노즐분출속도가 감소하면 화염이 노즐내부로 들어가는 주기적인 현상이 반복되어 이러한 진동패턴이 일어나는 것으로 사료된다. 추후 연구 시 이에 대한 보다 상세한 분석을 진행할 예정이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 200 kW급 역류형 가스터빈 연소기 적용에 적합한 저배기형 연소기의 설계인자를 도출하기 위해 예혼합 버너의 주 연소영역에서의 연소특성을 파악하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 단일 연료분사구조와 이중 연료분사구조를 갖는 예혼합 버너를 배가스 배출 측면에서 비교

분석하였을 때 이중 연료분사구 사용 시 연료/공기 혼합특성이 향상되어 CO와 NOx의 배출농도가 현저히 감소됨을 알 수 있다.

(2) 예혼합버너의 노즐출구 분사유속을 증가(40 m/s)시킬 경우 연소실 내 CO의 평균체류시간이 짧아짐에 따라 CO의 산화 반응이 줄어들어 CO 배출량이 증가하며, NOx의 경우 연소부하의 증가로 상대적인 열손실이 감소하여 NOx 배출이 증가된다.

(3) 노즐출구 직경과 라이너 직경 비(confined ratio)에 대한 연소부하 및 배가스 특성으로 볼 때 라이너 직경의 증가(75 mm)에 따라 연소부하 감소로 인해 NOx가 감소되고, 체류시간의 증가로 인해 CO의 산화 반응이 용이하여 CO 배출이 감소된다.

(4) 선정된 예혼합 버너의 연소반응영역에서 OH radical의 분포 및 화염구조를 확인한 결과 설계조건인 노즐출구속도(30 m/s)에서 화염길이 감소하고 화염이 안정화 되어 화염영역의 OH radical이 보다 대칭적으로 분포함을 알 수 있다. 또한 화염단면이미지로부터 OH radical이 벽면에 집중되어 있어 벽면근처에서도 반응이 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 2011, Commercialization of Cogeneration Plants Using 200kW Micro-Turbine, Planning Report, Ministry of Knowledge Economy.
- (2) Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill.
- (3) Fietelberg, A. S. and Lacey, M. A., 1997, "The GE Rich-Quench-Lean Gas Turbine Combustor," ASME, 97-GT-127.
- (4) Griebel, P., Fischer M., Hassa Ch., Magens E., Nannen, H., Winandy, A., Chrystostomou, A.,

- Meier, U. and Stricker, W., 1997, "Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines," ASME, 97-GT-146.
- (5) Kim, H. S., Lim, A. H., Ahn, K. Y. and Lee, S. M., 2004, "Study on the Combustion Characteristics of a Lean-Premixed Combustor," *Journal of Korean Society Combust*, Vol. 9, No. 1, pp. 25~31.
- (6) Cohen, H., Rogers, G. F. C. and Saravanamutto, H. I. H., 1987, Gas Turbine Theory, 3rd edition, Longman Scientific & Technical, England, pp. 414.
- (7) Williams, F. A., 1985, Combustion Theory, 2nd edition, Benjamin & Cuminy Publishing Inc. Menlo Park, California.
- (8) Oh, K. S. and Ahn, K. Y., 1997, "A Study on Design Technology of Turbomachinery," Korea Institute of Machinery & Materials Research, UCN 304-521.M.
- (9) Oh, K. S. and Ahn, K. Y., 1997, "Development of Aerodynamic Design and Analysis Technology for TurboGenerator and Relevant Fluid Machines (I)," *Korea Institute of Machinery & Materials Research*.
- (10) Ahn, K. Y., Kim, H. S., Bae, J. H. and Cho, E. S., 1998, "An Experimental Study for Preliminary Design of Gas Turbine Combustor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 22, No. 6, pp. 840~848.
- (11) Kim, H. S., Arghode, W. K. and Gupta, A. K., 2009, "Combustion Characteristics of a Lean Premixed LPG-Air Combustor," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 2, pp. 1045~1053.
- (12) Kim, H. S., Arghode, V. K. and Gupta, A. K., 2009, "Flame Characteristics of Hydrogen-Enriched Methane-Air Premixed Swirling Flames," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, Issue 2, pp. 1063~1073.
- (13) Turns, S. R., 2000, An Introduction to Combustion: Concepts and Applications, 2nd edition, McGraw-Hill, p. 752.