

## 스월 예혼합 버너의 연소 특성에 관한 실험적 연구

김 구\* · 조주형\*\*\* · 이동석\*\* · 김한석\*\*

손채훈\* · 이상민\*\* · 김민국\*\* · 안국영\*\*

\*세종대학교 · \*\*한국기계연구원

## Experimental Study on Combustion Characteristics of a Swirl-stabilized Conical Burner

Gu Kim\*, Ju Hyeong Cho\*\*\*, Dong Suk Lee\*\*, Han Seok Kim\*\*

Chae Hoon Sohn\*, Sang Min Lee\*\*, Min Kuk Kim\*\* and Kook Young Ahn\*\*

\*Sejong Univ., \*\*Korea Institute of Machinery and Materials(KIMM)

(Received 2 May 2014, Received in revised form 18 August 2014, Accepted 19 August 2014)

## ABSTRACT

Experimental study has been carried out to understand combustion characteristics of a swirl-stabilized premixed gas turbine combustor for power generation.  $\text{NO}_x$  and CO emissions, extinction limit, pressure loss, and temperature distribution were measured for various operating conditions. Results show that, with increasing inlet air temperature,  $\text{NO}_x$  is increased due to a higher adiabatic flame temperature while CO is increased or decreased for low or high A/F ratio regime, respectively, depending on the flame location. With decreasing load from the design condition,  $\text{NO}_x$  is decreased as thermal load is reduced. With further decreasing load, however,  $\text{NO}_x$  is increased due to a longer residence time. CO is decreased and then increased with decreasing load. Flame extinction limit is extended with increasing inlet air temperature as the recirculation strength is enhanced.

**Key Words** : Gas turbine, Premixed combustion,  $\text{NO}_x$  Emission, Swirl-premix burner

## 기 호 설 명

 $P_H$  : 버너 전단 압력 $P_L$  : 라이너 압력 $\Delta P$  : 차압 $P_{\text{fuel}}$  : 연료공급 압력

## 1. 서론

천연가스는 에너지의 안정적 수급을 위한 고효율 에너지원으로 주목받고 있는 화석 연료이다. 하지만 연소과정 중에 발생하는 공해성 연소배출물에 의한 환경오염문제가 심각하게 대두됨에 따라 이의 저감을 위한 청정화에 대한 요구는 지속적으로 증가하

고 있는 상황이다[1].

특히 발전용으로서 수요가 증가하고 있는 가스터빈(gas turbine)은 LNG 등 청정 연료를 주로 사용하여 후처리 없이 청정화가 가능하기 때문에 가스터빈 연소 과정에서의  $\text{NO}_x$ 저감 연구가 활발하게 진행되고 있다[2-4].

가스터빈 연소기에서 유해 배출물을 저감하기 위한 기술은 크게 희박연소(lean burn) 방식, 과농 희박연소(quick quench lean burn) 방식, 촉매 연소(catalytic combustion) 적용방식 등이 있다[5-8].

이 중 희박 예혼합 연소는 연료와 공기를 균일하게 예혼합하여 국부적인 연료 과농 영역을 줄이고 낮은 화염 온도로 인한 thermal  $\text{NO}_x$  생성을 억제하는

† Corresponding Author, antocho@kimm.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

특징을 가지고 있다[9].

본 실험에서 사용된 희박 예혼합 버너인 EV(Environmental Vortex)버너[10]의 설계 특징은 double cone 형상으로 인한 강한 스월의 형성과 vortex break down [11]의 생성에 의한 화염안정화에 있다[12].

그동안 EV 버너에 대해 많은 연소특성실험과 수치해석이 이루어져 왔다[13-18]. 예로서, Paschereit 등[17]은 EV 버너내부로 유입되는 연료량을 조절하여 NO<sub>x</sub> 배출량 또는 압력 섭동량을 관찰하였다. Dobbeling 등[18]은 상압과 고압조건에서의 EV버너의 안정성 및 NO<sub>x</sub>와 CO의 배출량을 측정 분석하였다.

본 연구에서는 EV축소버너의 구조적인 한계를 극복하기 위하여 GT11N 가스터빈모델에 적용되는 실스케일의 EV 버너를 이용하여 실제 가스터빈 연소기의 연소특성을 분석하였으며 가스터빈 성능에 중요한 인자로 작용하는 버너 차압특성도 분석하고자 한다.

## 2. EV 버너 형상 및 실험 방법

### 2.1. EV 버너 형상

실험대상인 실스케일 EV 버너형상을 Fig. 1에 나타내었다. double cone 형태로 설계되어 있으며 좌우 air slit을 통하여 예열된 공기가 유입된다. 이는 swirl을 형성하여 버너 전면부로 흘러가게 된다. 연료 공급은 cone 좌우 air slit 안쪽에 동일한 간격으로 직경 1.5 mm 홀 32개가 일렬로 배치되어 있고 이를 통해 연료가 공급된다. 이 후 air slit을 지나는 공기와 혼합되어 cone 내부로 유입된다.

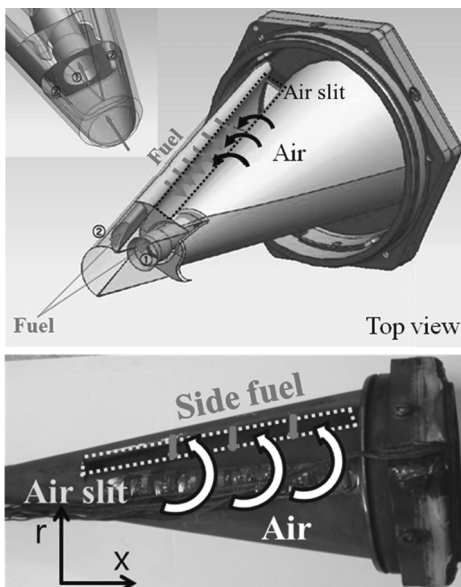


Fig. 1. EV burner geometry.

### 2.2. 실험장치 및 실험조건

#### 2.2.1. 실험장치

예혼합 연소 실험장치의 전체 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 장치구성은 예혼합기, 연료 및 공기 공급 장치, 공기 예열기, 배가스 측정 장치로 구성되어 있다. 공기와 연료는 Coriolis 유량계(Micro-motion)를 사용하여 공급하였다. 연료는 LNG를 사용하였고 공기는 Air compressor로 나온 건공기(dry air : 79% N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub>)를 공기예열기로 가열한 후 연소실 내부에 공급해 주었다. 파일릿 버너를 이용한 초기 점화 이후 배가스의 농도측정을 위해 삼중관구조의 수냉식포집관(water-cooled sampling probe)을 연소실 출구에 설치하였다. 포집된 가스는 삼중 수냉식포집관으로 급냉시킨 후 연속측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였다. 연소 시 화염위치의 예측을 위해 cone 내부, 버너 전면부, 라이너 내부의 온도 분포를 측정하였으며 이 때 사용된 열전대 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 이는 모두 K-type 열전대를 사용하였다. 연소실 차압특성을 확인하기 위해 사용된 압력계의 위치를 P<sub>H</sub>(버너전단 압력), P<sub>L</sub>(라이너 압력), P<sub>Fuel</sub>(연료공급 압력)으로 이 또한 Fig. 3에 표기하였다.

#### 2.2.2. 실험방법 및 조건

운전조건에 따른 연소특성실험을 수행하기 위하여 GT11N 가스터빈모델에 대한 Cycle 해석을 통하여 상압 연소 실험 조건을 도출하였으며 이를 Table 1에 정리하였다.

공기공급온도범위는 계절별 대기온도의 변화에 따른 압축기 후단 온도범위에 해당하며 성능실험 시 공급공기온도 유지를 위해 공기량을 각 부하별로 일정하게 유지한 후 연료량을 조절하여 다양한 공연비(A/F) 범위에서 실험을 수행하였다. 이 때 가스

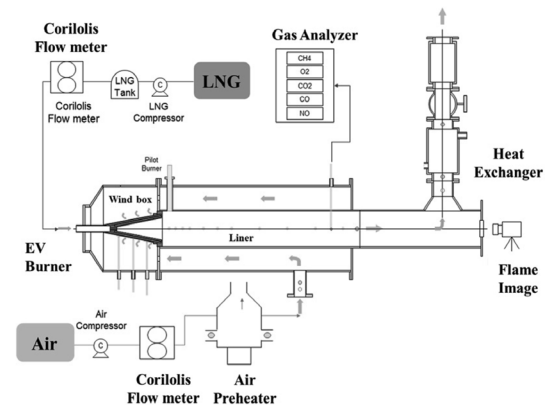


Fig. 2. Experimental apparatus with a premixed flame combustor.

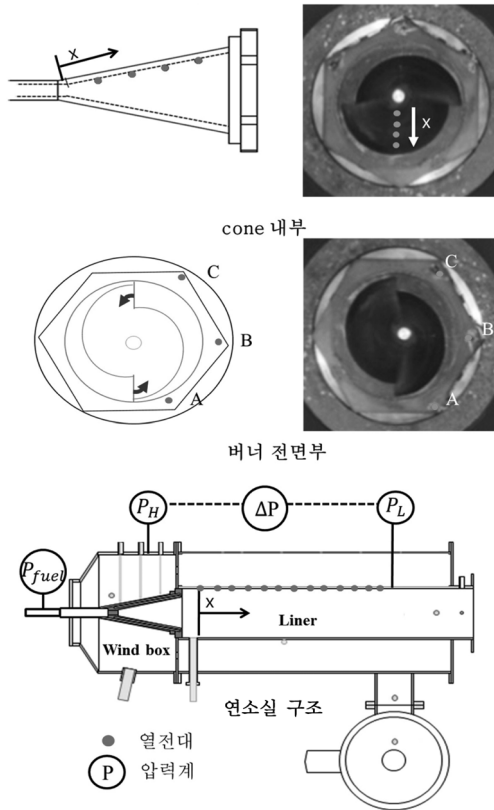


Fig. 3. Locations of temperature measurement.

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Unit	Value	Remark
Air mass flow rate	kg/s	0.5	Load 1.0
Fuel mass flow rate	kg/s	0.0138	
	kg/hr	49.95	
A/F	kg/kg	36.0	Reference A/F
Inlet air temperature	°C	330, 350, 370	

분석기로 측정된 유해물질 배가스(CO, NO<sub>x</sub>) 농도는 각 부하와 공연비에 따라 O<sub>2</sub> 15% 기준으로 환산하였다. 또한 공기공급온도 370°C, Load 1.0에서의 라이너 온도, 버너 전면부, 버너 내부의 온도분포를 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 온도별 배가스

공기공급온도(330°C, 350°C, 370°C)에 따른 혼합 특성 및 배가스 특성을 파악하기 위하여 측정된 NO<sub>x</sub>

배출량의 변화를 Fig. 4에 그래프로 나타내었다. 이때 공기량은 공기공급온도 유지를 위해 Load 1.0 조건에서 고정하여 실험을 수행하였다. NO<sub>x</sub>와 CO의 배출량은 NO<sub>x, reference</sub>, CO<sub>reference</sub>값으로 무차원화 한 후 도시하였다. 또한, 기준 산소농도 11.6%는 A/F 36.0으로 환산된다. Fig. 4의 NO<sub>x</sub> 배출특성 결과를 보면 공기공급온도가 370°C일 때 NO<sub>x</sub> 배출량이 가장 높게 측정되었다. 이에 온도 별(330°C, 350°C, 370°C) 단열화염온도를 계산해보면 각각 약 15°C의 차이를 보인다. 즉 화염 온도의 증가가 NO<sub>x</sub> 배출량의 증가로 이어짐을 예상할 수 있다.

Fig. 5에서는 공기공급온도 별(330°C, 350°C, 370°C) CO의 배출특성을 비교하였다. 공연비가 증가(또는 배출산소농도 증가)하는 경우에 원활한 산화반응으로 인하여 CO 배출이 대체로 감소함을 알 수 있다. 공기온도가 330°C인 경우에는 산소배출농도 11.5% 정도를 기준으로 CO 배출 특성이 달라짐을 볼 수 있는데 화염온도가 상대적으로 높은 O<sub>2</sub> 11.5% 이하 구간에서는 공기온도 감소 시 공기유속 감소로 고온

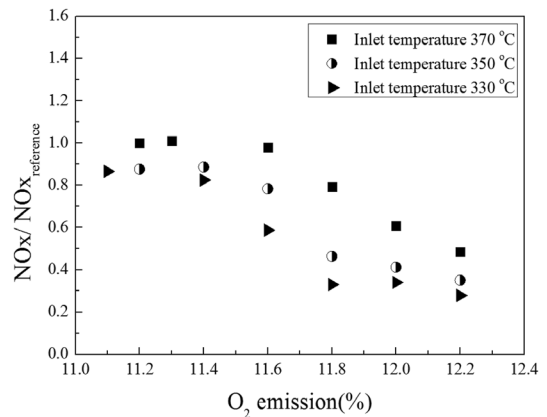


Fig. 4. Effect of inlet air temperature on NO<sub>x</sub> emissions.

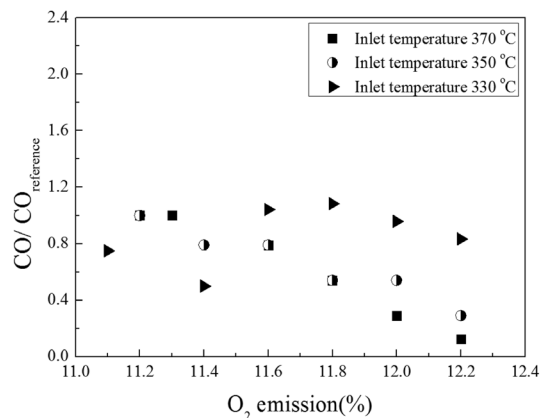


Fig. 5. Effect of inlet air temperature on CO emissions.

체류시간이 증가하고 분사된 연료와 공기의 momentum 비의 증가로 fuel penetration이 증가하여 혼합특성이 향상되므로[9] CO 배출이 감소하는 것으로 사료되며, 화염온도가 낮은  $O_2$  11.5% 이상 구간에서는 화염이 콘 내부를 벗어나 부분적으로 라이너에 접하면서 공기온도 감소 시 라이너 벽면에서의 CO quenching이 증가하여 CO 배출이 증가하는 것으로 사료된다.

### 3.2. 부하별 배가스

공기공급온도를  $370^\circ\text{C}$ 로 고정한 후 공기부하(Load)를 변경하여 연소를 수행하였으며 이 때 측정된  $NO_x$  배출량을 Fig. 6에 나타내었다.

공기부하에 따른  $NO_x$  배출 특성은 두 가지 상반된 영향에 의해 지배된다. 공기부하 증가 시에는 화염의 크기(D) 증가로 상대적인 열손실(=열손실/열부하  $\sim D^2/D^3 \sim 1/D$ )이 감소하여  $NO_x$  배출량이 증가하는 반면, 공기부하 감소 시에는 체류시간의 증가 및 혼합특성의 저하로  $NO_x$  배출량이 증가할 수 있다. 이러한 이유로 인하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Load 0.8의 중간 부하에서  $NO_x$  배출량이 최소가 된다. 앞서 설명한 바와 같이 부하가 가장 큰 Load 1.0에서는 부하 대비 상대적인 열손실의 감소로  $NO_x$  배출량이 가장 많고, Load 0.8로 부하 감소 시에는 열손실의 증가로 인하여  $NO_x$  배출량이 감소된다. 하지만 Load 0.6으로 부하가 너무 감소하게 되면 화염이 콘 내부로 이동하여 연료와 공기의 혼합거리가 감소하므로 혼합특성이 저하되고 고온부 체류시간이 증가하게 되어  $NO_x$  배출량이 다시 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 6에서 산소배출농도에 따른  $NO_x$  배출특성을 보면 산소배출농도 증가(공연비 증가)시 단열화염온도가 감소하게 되어  $NO_x$  배출량이 대체로 감소하게 된다. 일부 공연비 구간에서 산소배출농도 증가 시  $NO_x$  배출량이 감소하지 않는 이유는 혼합특성 변화

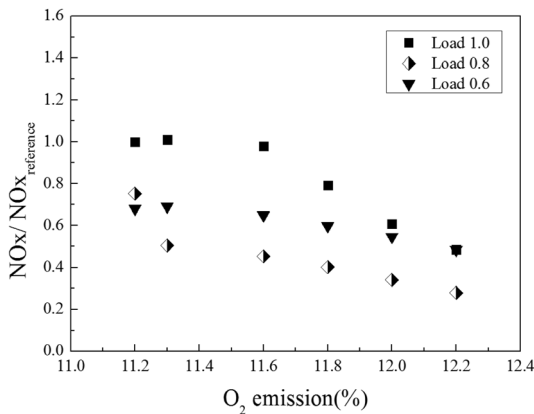


Fig. 6. Effect of Air Load on  $NO_x$  emissions (Inlet temperature  $370^\circ\text{C}$ ).

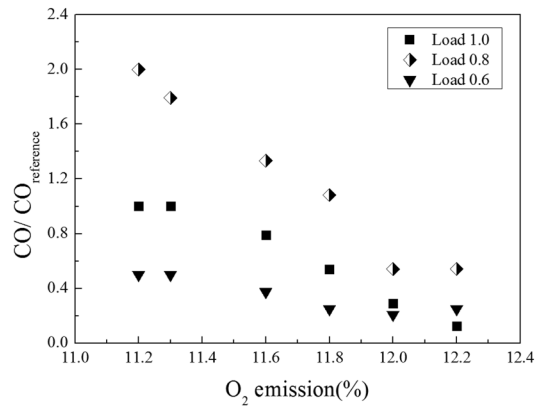


Fig. 7. Effect of Air Load on CO emissions (Inlet temperature  $370^\circ\text{C}$ ).

에 따른 국부적인 고온부(hot spot)의 생성에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 공기부하에 따른 CO배출 특성을 보여준다. Fig. 7을 보면 산소배출농도증가(공연비 증가)시 모든 Load의 CO 배출량이 감소한다. 공기부하가 Load 1.0에서 Load 0.8로 감소하게 되면 열손실 증가로 인한 CO 산화 반응률이 감소하여 CO 배출량이 증가하게 된다. 공기부하가 Load 0.8에서 Load 0.6으로 감소하게 되면 공기 유속의 감소에 의해 화염이 콘 내부로 이동해 고온부에서의 체류시간 증가로 CO배출량이 감소하게 되는 것으로 예상된다.

### 3.3. 버너각부별 온도분포

#### 3.3.1. 버너 전면부 온도분포

버너 전면부에  $60^\circ$  간격으로 설치된 3개의 열전대(Fig. 3 참고)로부터 Load 1.0, 공기공급온도  $370^\circ\text{C}$  조건의 온도분포 측정결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8을 보면 버너전면부 온도는 연소용 공기 공급

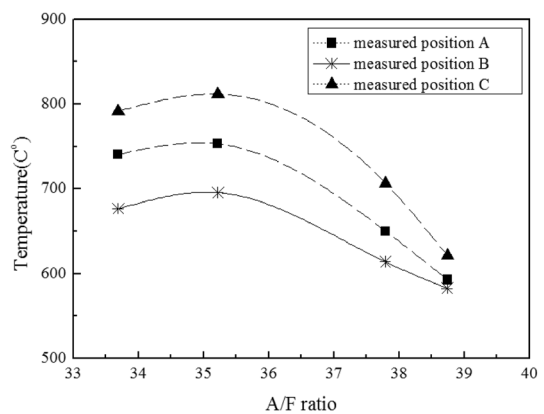


Fig. 8. Temperature characteristics at the front wall of the burner.

이 air slit의 출구기준 가장 멀리 떨어진 열전대(C)에서 가장 높게 측정되었고 slit과 slit 사이(B)에서는 가장 낮게 측정되었다. 이는 air slit으로부터 공급되는 예열된 공기가 점선방향으로 분사되면서 air slit 출구로부터 일정거리 떨어진 부분에서 냉각 효과가 생겨 slit과 slit 사이의 중간위치(B)에서 온도가 가장 낮게 측정되는 것으로 예상된다. 공연비(A/F) 33.7에서는 단일화염온도 상승으로 화염이 cone내부에 위치하면서 버너 출구 면을 가열하여 온도가 800°C 정도에 도달하는 것으로 판단된다. A/F 35.2의 경우에는 A/F 33.7의 경우와 비교하여 전면부 온도가 더욱 상승하는데 이는 cone 내부의 화염이 버너 출구 방향으로 이동하면서 버너전면부의 열전달이 증가하기 때문으로 예상된다. A/F 35.2를 초과하면 전면부 온도가 다시 감소하는데 이는 화염이 하류로 이동하여 버너전면부로부터 멀어지면서 전면부에 대한 복사열이 감소하기 때문으로 예상된다.

### 3.3.2. Cone 벽면 온도분포

cone 내부벽면에 설치된 4개의 열전대(Fig. 3 참고)로부터 부하 1.0, 공기공급온도 370°C 조건에 대한 온도 분포 측정 결과를 Fig. 9에 나타내었다. A/F 37.8 이하의 공연비에서는 cone 내부 표면 온도가 V자 형태를 보이며 중간부분 온도가 가장 낮게 측정되는데 이러한 현상은 side fuel manifold를 통해 상온의 연료가 공급되면서 cone 내부 표면이 냉각되기 때문으로 판단된다. A/F 38.7인 경우에는 cone 표면 온도가 하류방향으로 단조 증가하는 경향을 보이는데 이는 버너 외부로 발달하는 화염에 의해 억제되었던 유입공기의 축방향속도가 증가하게 되면서 연료분사라인에서 원주방향으로 90도 위치에 장착된 열전대에 도달하지 않고 버너출구를 빠져나가게 되어 상온 연료에 의한 벽면 냉각효과가 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

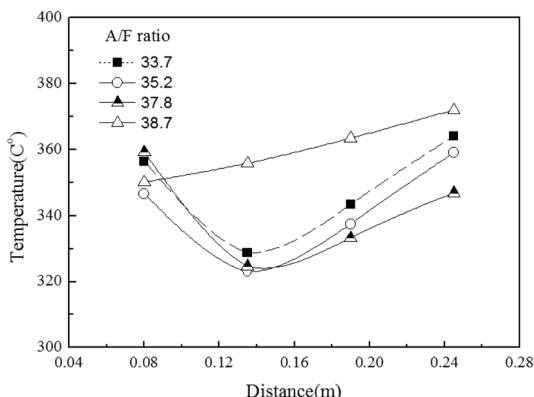


Fig. 9. Temperature characteristics at the side wall of the burner.

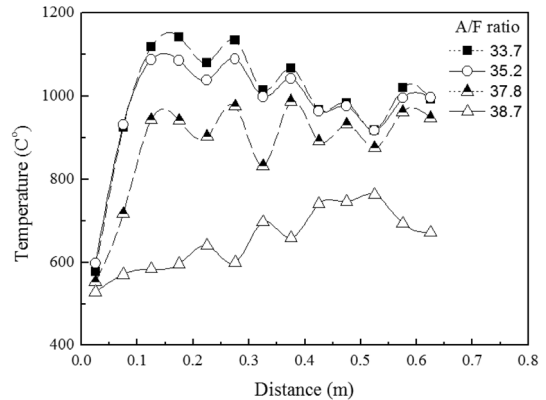


Fig. 10. Temperature distributions of combustor liner.

### 3.3.3. 라이너 내부 온도분포

라이너 내부 벽면에 등 간격으로 설치된 13개의 열전대(Fig. 3 참고)로부터 공연비 변화에 따른 라이너 온도 분포 측정결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 결과로부터 공연비 증가 시 단일화염온도 감소로 인해 라이너 온도가 전반적으로 감소함을 볼 수 있다. A/F 35.2 이하에서는 버너출구로부터 0.2~0.3 m까지 라이너 온도가 증가하다가 다시 감소하는 것으로 미루어 보아 이 위치까지 화염이 존재하는 것으로 판단된다. A/F 37.8에서는 화염이 더 넓게 분포하면서 라이너온도분포가 보다 균일해지며 A/F 38.7에서는 화염이 라이너 후단으로 더 이동하면서 약 0.5 m까지 라이너 온도가 증가함을 볼 수 있다.

### 3.4. 버너 차압 특성

Fig. 11에는 Load 1.0, 공기공급온도 370°C 조건에서의 공연비별 버너 차압을 버너 전단 압력( $P_H$ )으로 무차원화하여 나타내었다. 버너 차압은 Fig. 3에 도시된 바와 같이 버너의 공기유로인 Air slit을 기준으로 전단부(Wind box부,  $P_H$ )와 후단부(Liner부,  $P_L$ )의 압력 차이이며 버너 차압에 의한 압력 손실은 터빈 출력에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 이에 공기량을 Load 1.0로 유지한 상태에서 연료량에 의한 공연비를 조절한 경우의 차압 특성을 보여주는데, Air slit 차압을 보면 공연비가 증가할수록 감소 추세를 보인다.

이는 연료량의 감소(공연비 증가)에 따라 화염이 버너 하부로 이동하면서 버너 내부의 공기공급유로에 미치는 영향이 감소하기 때문으로 사료된다. 특히 A/F 38 이상에서는 Air slit 차압의 급감이 관찰되는데 이 조건에서는 화염이 버너 출구부의 하류 쪽으로 이동하여 넓게 퍼지면서 압력 손실이 급감하는 것으로 예측된다. 이러한 연소실 차압특성은 실제 가스터빈에서 그룹별 버너의 공연비 및 연소특성을 보다 정

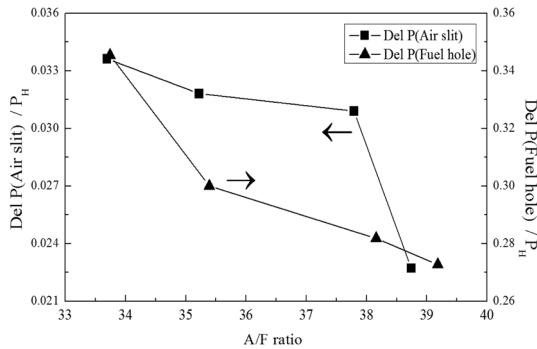


Fig. 11. Dependence of pressure loss of the burner upon A/F ratio.

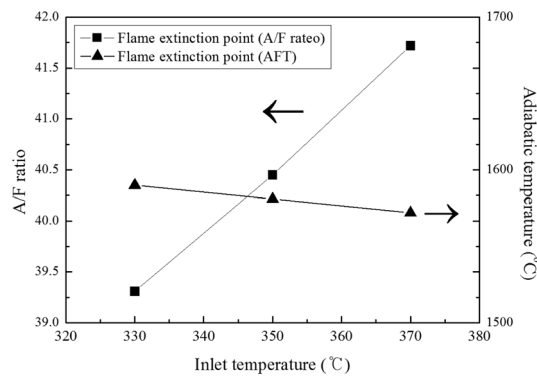


Fig. 12. Characteristics of flame extinction limit.

확하게 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다. Fig. 11에서 버너 Fuel hole을 기준으로 전후단의 연료압력 차이를 보면 공연비가 증가함에 따라 연료량 감소에 의한 연료 차압 감소가 관찰된다.

### 3.5. 연소 안정성 특성

연소안정성을 평가하기 위하여 화염 가연 한계구간을 온도 별(330°C, 350°C, 370°C)로 Fig. 12에 나타내었으며 공기공급온도 증가 시 화염 가연 한계공연비(A/F)가 증가함을 알 수 있다. 각 온도의 한계공연비에 해당하는 단열화염온도를 계산해 보면 공기공급온도 40°C 상승 시 단열화염온도는 약 20°C 감소함을 알 수 있다. 즉 공기공급온도 증가 시 가연한계가 증가하며 이는 유속의 증가로 재순환특성이 향상되어 화염 안정성이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

## 4. 결론

실스케일 EV double cone 버너의 연소특성을 파악하기 위해 공기공급온도와 Load에 따른 배가스(NO<sub>x</sub>, CO) 특성, 화염 안정 특성, 버너 및 연소실의

온도 및 차압 특성을 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 공기공급온도 370°C에서 단열화염온도 상승에 의해 NO<sub>x</sub> 배출량이 증가하며 CO 배출량은 공기공급온도 변화 시 공연비에 따라 CO 배출특성이 상반되는데 이는 화염위치에 따라 CO 배출에 영향을 미치는 인자가 다르기 때문인 것으로 사료된다.

2) 중간부하 Load 0.8에서 NO<sub>x</sub> 발생량이 가장 감소되며 Load 1.0에서는 연소 부하 대비 열손실 감소로 NO<sub>x</sub>의 발생량이 증가된다. 반면 Load 0.6에서는 Load 0.8과 비교하여 혼합특성 저하 및 체류시간 증가로 NO<sub>x</sub> 생성량이 증가하였다. CO배출량은 산화반응과 Load 별 유속변화에 따른 체류시간에 의해 Load 0.6에서 CO 배출량이 가장 적음을 확인할 수 있었다.

3) 버너 전면부 및 측면내부, 라이너 벽면의 온도 분포를 이용하여 연소반응으로 인한 연소기 내부의 화염위치를 예측할 수 있었다. 특히 A/F 38.7에서 버너출구의 하류로 화염이 넓게 발달함을 알 수 있었는데 이는 버너 차압 특성 결과에서도 확인할 수 있었다.

4) 공기공급온도 증가 시 가연한계가 증가함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] S.K. Cha, Y.S. Kim, J.J. Lee, T.S. Kim, J.L. Sohn, Y.J. Joo, Analysis of the Influence of CO<sub>2</sub> Capture on the Performance of IGCC Plants, KSFEM, 13 (1), (2010) 9-16.
- [2] J.H. Lee, K.J. Cha, D.J. Kim, The Basic Study on the Combustor Characteristics for NO<sub>x</sub> Reduction in Gas Turbine Combustor, Trans. of the KSME spring conference(B), 1999, 507-512.
- [3] G. Cau, V. Tola, P. Deiana, Combustion and emission characteristics in a gas turbine combustor at different pressure and swirl condition, Applied Thermal Engineering, 19 (1999) 949-967
- [4] H. Cohen, G.F.C. Rogers, H.I.H. Saravanamutto, Gas Turbine Theory, 3rd edition, Longman Scientific & Technical, England, 1987, 414.
- [5] M.C. Lee, J.H. chung, W.S. Park, S. Park, Y.

- Yoon, The combustion tuning methodology of an industrial gas turbine using a sensitivity analysis, *Applied Thermal Engineering*, 50 (2013) 714-721.
- [6] A.S. Fietelberg, M.A. Lacey, The GE Rich Quench Lean Gas Turbine Combustor, *ASME*, (1997) 97-GT-127.
- [7] P. Griebel, M. Fischer, C. Hassa, E. Magens, H. Nannen, A. Winandy, A. Chrystostomou, U. Meier, W. Stricker, Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines, *ASME*, (1997) 97-GT-146.
- [8] R. Carroni, T. Griffin, G. Kelsall, Cathlean: catalytic, hybrid, lean-premixed burner for gas turbines, *Applied Thermal Engineering* 24 (2004) 1665-1676.
- [9] A.H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*, 1983, 1st ed., McGraw-Hill, 117-123.
- [10] C. Steinbach, N. Ulibarri, M. Garay, H. Lubcke, T. Meeuwissen, K. Haffner, J. Aubry, D. Kodim, Combustion Optimization For The ALSTOM GT-13E2 Gas Turbine, *ASME Turbo Expo*, (2006) GT2006-90943.
- [11] O. Lucca-Negro, T.O. Doherty, Vortex breakdown: a review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 27 (2001) 431-481.
- [12] F. Güthe, R. Lachner, B. Schuermans, F. Biagioli, W. Geng, A. Inauen, S. Schenker, R. Bombach, N. Tylli, W. Hubschmid, Flame Imaging On The ALSTOM EV-burner: Thermoacoustic Pulsations and CFD-validation, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, (2006) 1-32.
- [13] B. Fernando, G. Felic, Effect of Pressure and Fuel-Air Unmixedness on NO<sub>x</sub> Emissions from Industrial Gas Turbine Burners, *Combustion and Flame*, 151 (2007) 274-288.
- [14] V. Zimont, W. Polifke, M. Bettelini, W. Weisenstein, An Efficient Computational Model for Premixed Turbulent Combustion at High Reynolds Numbers Based on a Turbulent Flame Speed Closure, *ASME*, (1997) 97-GT-395.
- [15] F. Biagioli., P. Schiessel, L. Fischer., Investigation Of Flame Stability Characteristics Of The EV Burner On The GT13E2 Engine, *ASME Turbo Expo*, (2008) GT 2008-50274.
- [16] F. Peter, S. Patrick, O.P. Christian, Mixing Field Analysis Of A Gas Turbine Burner, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE*, 2002, 2002-39317.
- [17] C.O. Paschereit, B. Schuermans, D. Buche, Combustion Process Optimization Using Evolutionary Algorithm, *ASME Turbo Expo*, (2003) GT2003-38393.
- [18] F. Dinelacker, C.O.A. Soika, D. Most, D. Hofmann, A. Leipertz, W. Polifke, K. Döbeling, Structure of Locally Quenched Highly Turbulent Lean Premixed Flames, *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1998, 857-865.