

축류 선회 버너에서 혼합도 개선을 통한 배출물 저감 기술

박정목* · 김민국**† · 이상민** · 김한석** · 안국영**

Effect of fuel-air mixing characteristics on reduction of emission for a swirl stabilized burner

Jungmok Park*, Minkuk Kim**†, Sang Min Lee**, Han Suk Kim**, Kook Young Ahn**

본 연구에서는 축류 선회 버너의 이중 연료분사 구조에서 연료분배량을 변화에 따른 연료와 공기의 혼합 특성 변화가 배출물 저감 성능에 어떤 영향을 미치는 지에 대하여 살펴보고 또한 축류 선회기의 타입 중 어떤 것이 혼합 및 배출특성에 유리한 지에 대해 연구하였다.

축류 선회 버너의 형상은 이중(dual-stage) 연료 분사구조를 가지며 연료/공기가 예혼합되어 연소실에 공급된다. 화염 안정 확보를 위해 선회기(swirler)를 1, 2단의 연료분사구 사이에 위치시켰으며, 선회각은 선행연구 결과를 반영하여 45도로 선정하였다. 이때 선회수(swirl number, S)는 약 0.816이다. 연소실 직경은 노즐 출구 직경과의 비를 고려하여 75 mm (내경)로 설계하였다. 축류 선회 버너의 타입은 Axial, Radial 그리고 cyclone type 3종류로 실험을 실시하였다.

실험은 혼합 특성 실험과 연소 특성 실험 두 가지로 나누어 진행하였다. 실험 장치는 Fig.1와 같이 예혼합기, 유량 제어부, 측정부, 혼합도 측정 위치 조절부로 구성되어 있고 연료는 메탄(CH₄: 99.95%)을 사용하였다. MFC 유량계(Brooks)와 코리올리 유량계를 사용하여 연료와 공기 유량을 제어하였다. 혼합도 측정을 위하여 내경 1mm, 길이130mm의 Probe를 사용하였으며 메탄 농도 3% 까지 측정이 가능한 가스분석기(Greenline 9000)를 사용하였다. 이때 반경방향 및 회전방향 조절이 가능한 구조물을 사용하여 측정 프로브의 위치를 변화시키면서 노즐 출구면에서의 연료 농도 분포를 측정하였으며 각각의 위치는 Fig.1에 표시하였다. 혼합특성의 실험 조건은 Table1와 같고 실험case는 Fuel stage1,2의 연료 분배를 다르게 하여 4가지로 실시하였다. 연소 및 화염 특성실험은 Table 1의 조건을 기준으로 하여

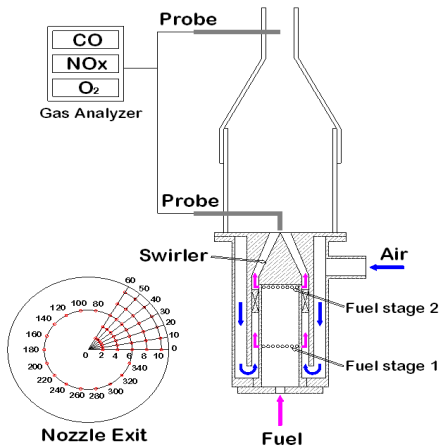


Fig. 1 Experimental setup

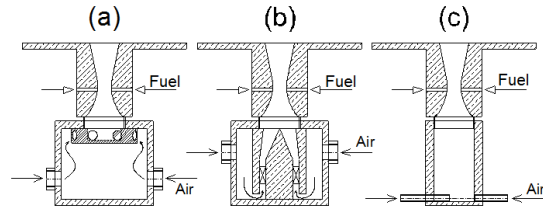


Fig. 2 Experimental setup (a) Radial type, (b) Axial type, (c) Cyclone type

Table 1 Experimental condition

Parameters	Unit	Value	Remarks
Inlet Pressure	kPa	101.3	
Inlet Air Temp.	K	300	
Fuel Mass Flow rate	kg/h	1.4~2.2	
Air Mass Flow rate	kg/h	48.31	Nozzle exit velocity(30m/s)
Liner Diameter	mm	75	
Liner length	mm	250	

* 과학기술연합대학원대학교 환경에너지기공학

** 한국기계연구원 환경기계시스템연구실

† 연락처, mkkim@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7276 FAX : (042)-868-7284

Fuel stage1,2의 연료 분배를 4가지 Case로 실시하였다. 연소실의 초기점화는 토치를 이용하였고 주 연소영역으로 공급되는 연소용 공기와 연료량을 조절하여 당량비 변화에 대한 NOx와 CO의 배가스 농도를 측정하고 O₂15%기준으로 환산하였다. 배가스의 농도측정을 위해 삼중관 구조의 수냉식포집관(water-cooled sampling probe)을 연소실 출구에 설치하였으며, 포집된 배가스는 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였다. 화염구조 및 OH 자발광의 분포를 파악하기 위해 307nm 필터(narrow band interference filter)를 장착한 ICCD(intensified charge-coupled device) 카메라를 사용하였다.

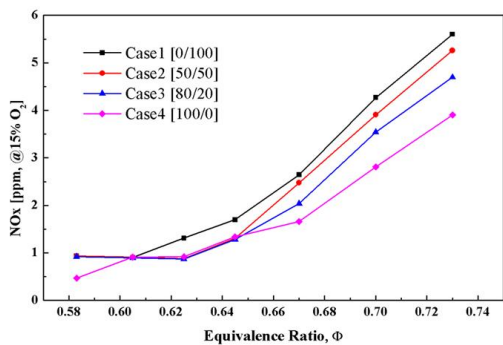


Fig. 3 Effect of staged fuel injection on NOx and CO emissions

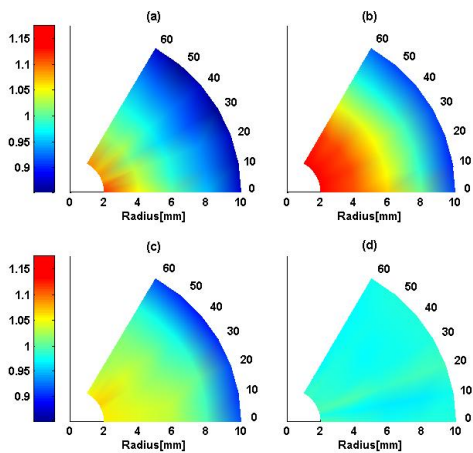


Fig. 4 Visualization of CH₄ concentration in nozzle exit according to staged fuel injection. (a)Case1[0/100], (b)Case2[50/50], (c)Case3[80/20], (d)Case4[100/0]

Fig. 3은 연료분배 조건에 따른 배출물 저감 성능 변화를 보여준다. 각 조건 별 NOx의 배출 특성을 살펴보면, case1~4순서로 배출물 저감 성능

이 우수함을 알 수 있다. 보다 상류에 위치한 1단 연료 분사구의 비중이 높을수록 노즐 출구까지의 예혼합 거리가 증가하여 혼합특성이 향상되고 이로 인하여 주 연소영역에서의 국부적인 고온부 형성이 감소하므로 Thermal NOx의 배출이 감소될 수 있다. Fig. 4은 연료/공기의 혼합 정도를 2차원적으로 가시화한 그림이다. 연료가 상류에 많이 분사되는 (d)의 경우, 공간적으로 균일한 혼합도를 보이고 있다. (c)의 경우에는 약 20%의 연료가 하류 부근에 분사되는 효과로 인하여 중심과 벽면부의 편차가 적게 나타나고 있다. (a)의 경우에는 하류 부근에 100%의 연료가 분사되고, (b)의 경우에는 하류쪽 연료분사량 증가와 낮은 연료 분출 속도효과로 인하여 중앙부에 과농한 부분과 벽면부에 희박한 영역이 강하게 형성됨을 알 수 있다.

이번 단락에서는 축류 선회 버너의 타입별 혼합 특성에 따른 배출물 저감 성능에 대하여 살펴보겠다. Fig. 5는 연료와 공기의 공간적인 혼합 성능의 지표가 되는 Unmixedness에 대해 보여주고 있다. Unmixedness, U의 정의에 따라 U의 값은 0에서 1사이에서 계산되어지고 낮은 값의 U가 우수한 혼합 특성을 갖게 된다. Fig. 5의 결과에서 보여주는 것과 같이 Radial type이 가장 우수한 혼합특성을 보여주고 있고 다음은 Axial, Cyclone 순이다.

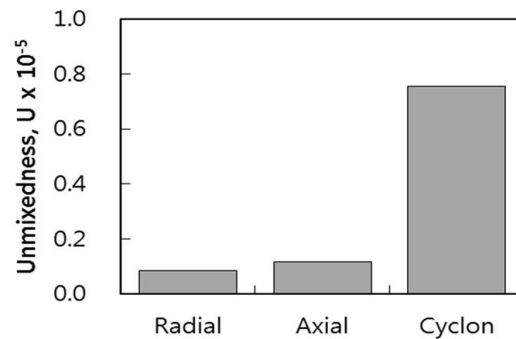


Fig. 5 Unmixedness for various swirl types

가스터빈에서 혼합특성은 NOx 배출을 제어하는데 중요한 인자이다. 혼합특성이 나빠지게 되면 국부과농지역이 발생하게 되고 이로 인해 화염온도가 높아지게 되어 Thermal NOx가 증가 되게 된다. Fig. 6은 3가지 축류 선회 버너의 NOx 배출 결과를 보여주고 있다. Radial type이 가장 우수한 NOx 저감 성능을 보여주고 있는데 이것은 Fig 5.의 혼합특성 결과를 잘 반영하고 있다. Cyclon의 경우 Swirl intensity가 높으면

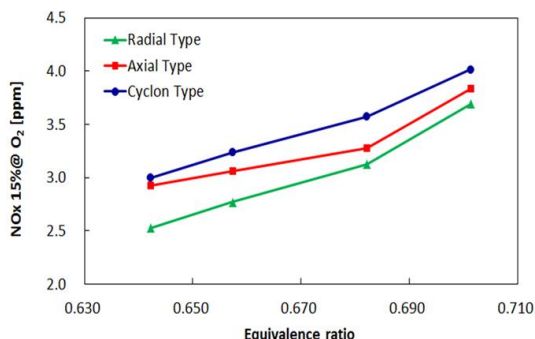


Fig. 6 NOx emissions with equivalence ratio
Recirculation zone이 커져 화염의 온도가 낮아져 NOx형성이 줄어드나 본 연구의 경우 연료가 벽면부에서 공급되면서 혼합특성이 나빠져 NOx배출성능이 나빠졌다. Axial의 경우 또한 혼합 특성의 결과가 잘 반영된 NOx 배출특성을 보여주고 있다.

Fig. 7는 당량비를 변화시켜면서 3가지의 축류 선회기의 Abel transformed image를 보여 주고 있다. 고온지역에서 발생된 Thermal NOx는 화염온도와 체류 시간에 영향을 받게 된다. 혼합거리가 길어지게 되면 혼합에 필요한 체류시간이 증가하게 되어 혼합특성이 개선되게 된다. 이는 혼합 특성이 화염의 위치에 따라 좌우될 수도 있다는 것을 의미한다. Radial type의 경우 노즐 출구에서 약간 부상된 것이 혼합 특성이 개선된 것으로 사료된다. 그러므로 고온지역이 잘 관찰되지 않는 Radial type의 경우 본 연구에서 가장 우수한 NOx 배출 특성을 보여주고 있다. 그리고 화염의 위치가 Axial과 Cyclon으로 갈수록 노즐 출구쪽으로 가까워 지는 것을 볼 수 있고 이는 mixing length가 줄어 혼합특성이 나빠질 것으로 예상된다. 또한 화염 인텐시티가 Axia, Cylone순으로 강해지는 것을 볼 때 Cyclon의 배출특성이 가장 나쁜 결과를 잘 설명해주고 있다. 덧붙여 화염의 길이 또한 화염 온도와 잘 연관되어 있다. 동일한 연료 유량을 넣었을시 화염길이가 길면 연료가 넓은 지역에 분산되어 연소되어 화염온도가 낮아지고 화염길이가 짧으면 반대가 될 것이기 때문이다.

본 연구에서는 이중 연료 분사 구조를 갖는 축류 선회 버너에서 1,2단의 연료 분사량 제어에 따른 혼합 특성과 연소 특성을 살펴 보았다. 그 결과 상류부에 연료 분사량을 증가시킬 경우, 혼합거리의 증가로 인하여 혼합 특성이 향상되는 것을 알 수 있었다. 축류 선회기의 타입에서는 비혼합도가 우수하며 노즐 출구로부터 약간 부상된 화염으로 인해 혼합특성이 우수해지고 화염의 길이로 인해 화염의 온도가 낮은 Radial type이

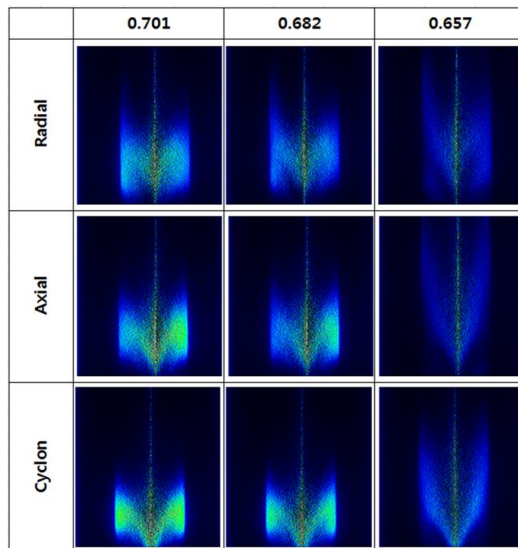


Fig. 7 Abel transformed images of various swirl types at each equivalence ratio
가장 우수한 NOx 저감 성능을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] Lefebvre, A. H., 1983, Gas turbine combustion, McGraw-Hill.
- [2] Kim, H. S., Lim, A. H., Ahn, K.Y., 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.
- [3] Oh, K. S., Ahn, K. Y., 1997, "A study on design technology of turbomachinery," Korea Institute of Machinery & Materials Research, UCN 304-521.M.
- [4] Oh, K. S., Ahn, K. Y., 1997, "Development of Aerodynamic Design and Analysis Technology for TurboGenerator and Relevant Fluid Machines(I)", Korea Institute of Machinery & Materials Research.