

論文

스윙연소기에서 연료스윙유동이 NO_x 배출에 미치는 영향

조진우*, 황상호**, 최경민***, 김덕줄***

Influence of Fuel Swirl Flow on NO_x Emission in Swirl Combustor

Jin Woo Cho*, Sang Ho Whang**, Gyung-Min Choi*** and Duck-Jool Kim***

ABSTRACT

In this study, experimental investigations were conducted on NO_x emission characteristics with fuel swirl flow in swirl combustor. Many types of vanes, which altered air and fuel swirl angles, were employed to verify the mixing processes. For strong air swirl, fuel counter-swirl resulted in relatively large turbulent intensity, high energy to the high frequency region and narrow width of high temperature region compared with co-swirl condition. These effects of fuel counter-swirl resulted in low NO_x emission characteristics at strong air swirl condition. And NO_x reduction mechanism was also discussed.

초 록

본 연구에서는 스윙 연소기에서 연료스윙유동이 NO_x 배출특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 공기와 연료스윙각을 변화시키기 위해 환형베인을 사용하였고 베인각의 변화에 따라 혼합공정을 변화시켰다. 공기스윙이 강한 조건에서 연료 Counter-swirl의 경우, 비연소장에서 큰 난류강도의 특성을 나타내고 상대적으로 고주파 영역까지 높은 에너지를 가지고 있으며, 고온 영역이 좁게 나타났다. 이러한 연료 counter-swirl 영향으로 저NO_x 배출특성이 나타났으며, NO_x 저감 기구가 논의되었다.

Key Words : Co-swirl(공기스윙 방향의 연료스윙), Counter-swirl(공기스윙 역방향의 연료스윙), NO_x Emission(질소산화물배출)

1. 서 론

연소는 에너지를 얻는 가장 일반적인 방법이며, 실용연소기에 가장 많이 이용되고 있는 연소형태인 난류 확산화염은 난류 유동에 의한 혼합과 연소 반응이 서로 간섭하며 이루어지고 있다.

이 두 현상간의 복잡한 상호작용이 화염구조 및 오염물질 생성기구에 중요한 역할을 하며, 이

에 동반하여 발생하는 대기 오염물질의 규제를 극복하기 위한 고효율 청정연소기술의 개발이 시급하게 요구되고 있다.

많은 연구자들[1~3]이 가스 스윙연소기에서의 화염의 안정성, 화염날림(blowout), 재순환 영역 그리고 배출가스에 관한 연구를 수행하였다.

Takashi 등[4]은 선회강도, 유속 등 공기역학적인 특성을 변화시켜 이중스윙류에 의한 혼합율의 증대가 연료과농영역을 감소시키고 저NO_x특성을 보이는 것을 실험을 통해 관찰하였으며, Hillemans 등[5]은 스윙의 효과는 화염의 안정성과 혼합과정을 향상시킨다고 보고하고 있다.

Xue 등[6]은 부분에혼합화염에 관한 연구에서 예혼합영역에서 전체 NO_x배출을 결정짓는 주된 인자는 Thermal NO이지만 비예혼합영역에서는

† 2004년 12월 27일 접수 ~ 2005년 4월 22일 심사완료

* 정희원, 부산대학교 기계공학과 대학원

** 정희원, 부산대학교 기계기술연구소

*** 정희원, 부산대학교 기계공학부

연락처, E-mail : choigm@pusan.ac.kr

부산 금정구 장전동 산30

prompt NO가 주된 인자로 작용하며, 이때 prompt NO의 형성에는 CH가 주된 인자로 작용한다고 보고하고 있다. 또한 Miller 등[7]은 탄화수소계 연료를 대상으로 prompt NO 생성 메커니즘을 통해서 CH가 NO생성에 중요하다고 보고하였으며, 이때 OH, O, O₂ 등의 농도가 prompt NO 생성에 중요하다고 보고하고 있다.

이상과 같이 확산화염에 관하여 많은 연구가 이루어져 왔지만 선행연구의 대부분은 공기층 스윙조건의 변화에 따른 연소특성의 분석이 그 주된 초점이었다. 선행연구들 중 이중스윙류에 의한 혼합물의 증대가 연료과농영역을 감소시키고 저NOx특성을 나타내는 연구결과[4]로부터, 연료층의 스윙과 그 스윙의 방향이 NOx 배출특성에 미치는 영향 또한 중요함을 예측할 수 있다. 그러나 연료스윙이 NOx 배출특성에 미치는 영향을 조사한 연구는 극히 드물다.

따라서, 본 연구에서는 공업용료, 가스터빈기관 등 실제 산업에 그 응용분야가 넓은 스윙연소기에 대한 실험적 연구를 통해서 고효율 및 저NOx 연소기 설계의 기초 자료를 제공하기 위하여 다양한 공기층 스윙유동에 대하여 다양한 각도를 가지는 연료층 스윙을 Co-swirl과 Counter-swirl로 변화시키며 이때 연료스윙이 스윙연소기에서의 NOx 배출특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

II. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 연소 실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연료-공기 공급장치, 연소로 그리고 온도, 배기가스, 유속 및 화학발광강도측정을 위한 계측장치로 구성되어 있으며, 연소기

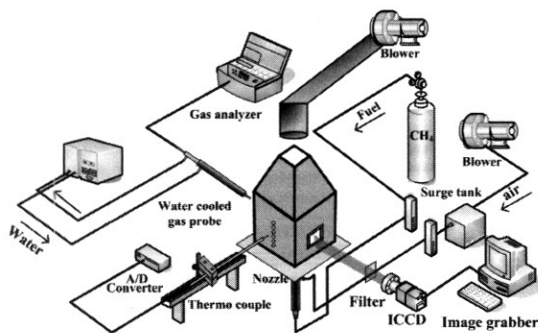


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up

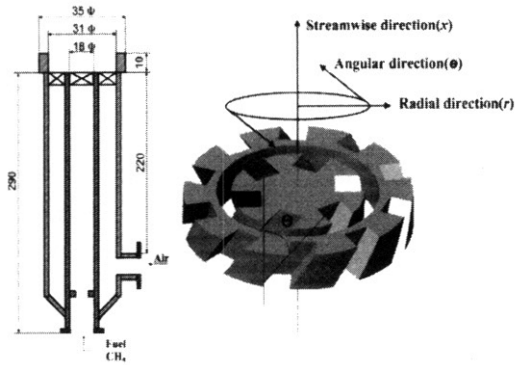


Fig. 2. Configurations of nozzle and swirler

는 가로와 세로가 각각 290mm, 높이가 300mm의 정방형이며 화염의 관찰 및 라디칼 자발광 측정을 위한 석영 유리 관측창(100mm×80mm)이 전면에 설치되어 있다.

Fig. 2는 연료 및 공기노즐부와 스윙러의 상세도를 나타내고 있다. 연료가 중심에서 공급되고 그 주위를 산화제인 공기가 공급되는 구조로 되어 있으며, 연료층과 공기층 각각에 환형배인방식을 이용한 스윙러를 이용하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

전체 NOx, 화염의 온도, 국소 평균 NOx, 라디칼 자발광 강도측정 및 비연소장의 난류특성은 Table. 1에 나타나 있는 공기스윙에 대한 연료스윙 조건 각각에 대해서 수행되었다. 또한 본 연구에서 채택한 베인각이 30°, 45°, 60° 일 때 선회수는 각각 0.4, 0.7, 1.2가 된다.

화염면의 온도측정은 R-type(Pt/Pt-13%Rh) 열전대를 사용하였으며, 유동축방향(x)과 반경방향(r)으로 각각 6mm, 3mm 간격으로 온도를 측정하였다. 각 조건에서 최고 온도가 검출되는 유동축방향 특정거리의 단면을 대표단면으로 정의하고 전체 NOx 측정을 제외한 모든 측정은 대표단면에서 수행하였다.

연소실 내부의 가스 조성을 측정하기 위한 가스 포집관은 스테인리스 스틸의 3중관형 수냉방

Table 1. Experimental conditions

스윙 베인각, θ (°)	Air	30, 45, 60
	Fuel	0, 30, 45, 60, -30, -45, -60
연료속도, V_f (m/s)		1.04
공기속도, V_a (m/s)		10.03
유로면적, A (mm ²)		54

식의 프로브를 이용하였다. 샘플링 프로브의 입구 직경을 0.25mm로 하였으며, 중간생성물에 의한 화학반응을 정지시키기 위하여 직경 4mm로 급격히 확대시켜 냉각시켰다. 프로브 삽입에 의한 유동장 변형을 최대한 방지하기 위하여 진공 펌프를 이용하여 적절한 속도로 흡입하였다. 포집된 가스는 수분을 제거한 후 가스분석기(COSA6000)를 사용하여 NO_x, O₂에 대하여 측정을 하였으며 표준가스를 사용하여 가스 분석기를 보정하였다.

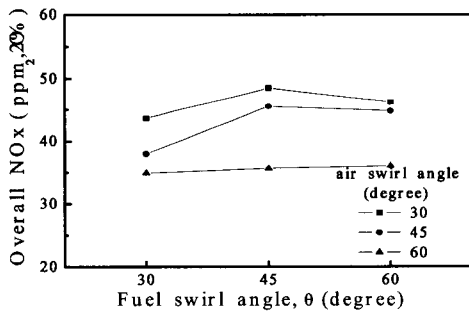
화염의 화학발광강도에 관한 정보의 취득에는 ICCD 카메라를 사용하였다. 석영유리로 된 가시화창을 통해 각각의 스윙조건에 대하여 CH*와 OH* 화학발광강도의 측정을 하였고, CH*, λ=430.7 ± 2 nm, OH*, λ=307.1 ± 1.5 nm 파장대인 간섭필터를 사용하였다.

비연소장에서의 난류특성측정에는 정온형 열선 유속계(IFA·300)을 사용하였다.

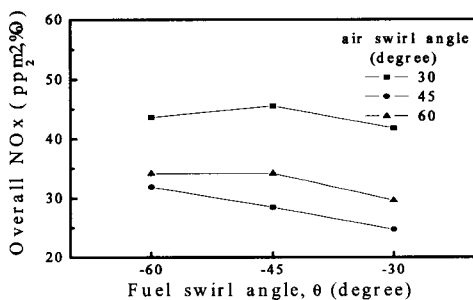
III. 실험 결과 및 고찰

3.1 전체 NO_x

Fig. 3은 가시화된 화염길이의 2배 지점에서



(a) Fuel Co-swirl condition

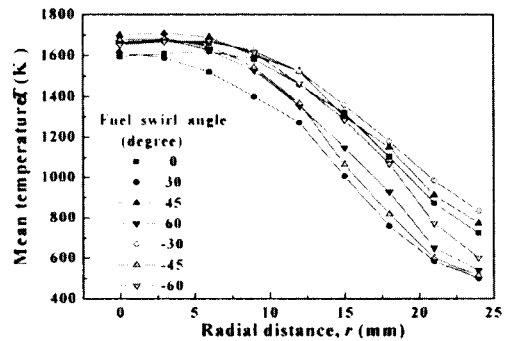


(b) Fuel Counter-swirl condition

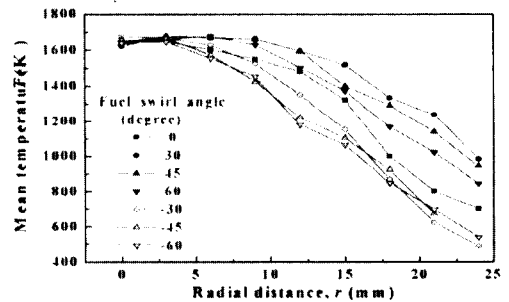
Fig. 3 Overall NO_x concentration

측정된 NO_x 값을 O₂ 2% 환산농도로 나타낸 것이다. 전체 NO_x 농도는 Counter-swirl 조건의 경우가 Co-swirl 조건보다 실험조건 전체에 있어서 평균 16% 낮은 NO_x 배출특성을 나타내었다. 전체적인 경향은 연료스윙에 의한 영향보다 공기 스윙에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 본 실험장치에서 환형베인형태의 연료측 유로면적이 넓기 때문에 화염을 안정화시키고 화염의 부상 및 화염날림(blow-out)을 막기 위해 연료에 비해 공기의 출구속도가 매우 큰 것에 기인한다고 사료된다.

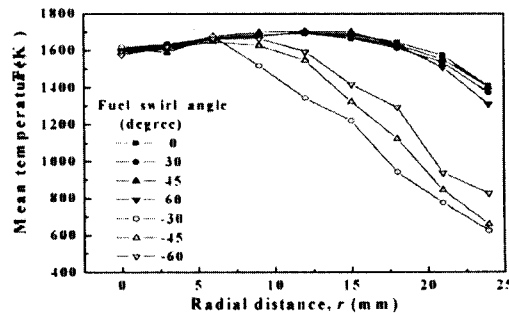
3.2 온도분포



(a) Air swirl 30° condition



(b) Air swirl 45° condition



(c) Air swirl 60° condition

Fig. 4. Radial profiles of mean temperature

Fig. 4는 각 조건에서 온도분포를 나타낸다. 전체적으로 화염의 중심에서 반경방향으로 거리가 증가함에 따라 온도가 감소하는 경향을 보인다.

공기스윙 30° 조건에서는 연료스윙각의 변화에 따라 온도분포에 있어서 특별한 경향이 나타나지는 않지만 공기스윙 45° 조건에서는 Co-swirl 조건보다 Counter-swirl 조건에서 고온 영역이 좁게 나타났다. 이와 같은 경향은 공기 스윙 60° 조건에서 보다 명확하게 나타나고, 고온영역이 감소하면서 단면의 최고온도는 Co-swirl에 비해 그다지 증가하지 않는 현상으로부터 Thermal NOx의 저감을 예상할 수 있다.

공기스윙이 강한 경우(60°) 연료스윙각의 변화에 의한 연소 특성의 변화가 크게 나타나므로 앞으로의 논의는 공기스윙 60° 조건에 초점을 맞추었다.

3.3 국소평균NOx 및 메카니즘

Fig. 5는 공기스윙 60° 조건에서의 연소장내 NOx의 분포를 나타낸다. 중심축에서 반경방향 12mm 영역까지는 큰 차이가 나타나지 않지만 반경방향 12mm 이상에서 Counter-swirl 조건이

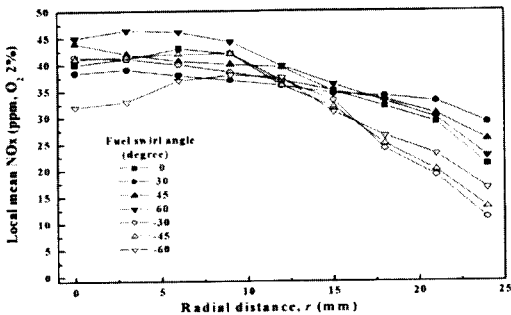


Fig. 5. Local mean NOx at air swirl 60° condition

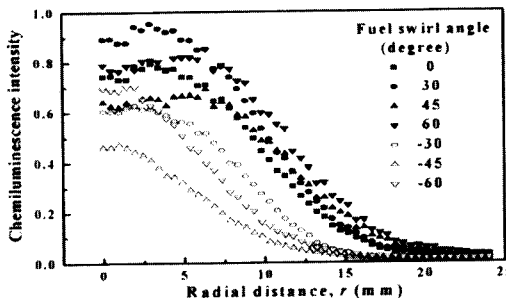


Fig. 6. Radial profiles of CH+ band chemiluminescence intensity at air swirl 60° condition

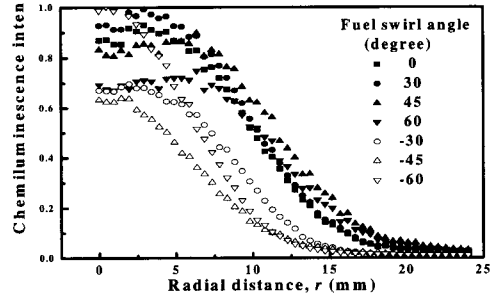


Fig. 7. Radial profiles of OH+ band chemiluminescence intensity at air swirl 60° condition

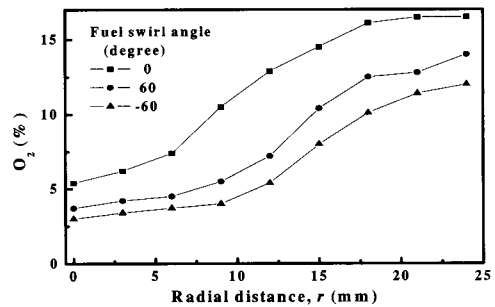


Fig. 8. O2 concentration at air swirl 60° condition

Co-swirl 조건보다 상대적으로 낮은 NOx배출특성을 보인다. 이러한 결과는 화염의 온도분포와 밀접한 관련이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 온도분포 및 국소 평균 NOx 분포에서 가장 큰 Counter-swirl의 효과를 나타내고 있는 공기스윙 60° 조건에서 화학발광강도를 나타내며, 최대 강도값으로 무차원화하였다.

아벨(Abel)변환 후 CH밴드와 OH밴드 두 경우 모두 연료스윙이 Counter-swirl 조건에서 화학발광강도 값이 Co-swirl에 비해서 낮게 나타남을 알 수 있다. 그림 4의 온도분포에서 기대되는 thermal NOx의 저감도 예상되지만, 선행연구 [7,8]에서 보고된 바 있는 비예혼합영역에서 O2, OH, O가 존재할 때 CH의 존재에 의한 prompt NO 생성메카니즘에 의하면 Counter-swirl 조건에서 CH 강도가 상대적으로 낮게 나타나는 것을 볼 때 prompt NO의 감소가능성을 예상할 수 있다. Fig. 8은 Co-swirl과 Counter-swirl 조건에서의 O2 농도를 나타낸 것이다. Counter-swirl 조건에서 낮게 나타나는 O2농도의 경향을 볼 때 상대적으로 Co-swirl 조건보다 활발한 연소반응이 일어났음을 예상할 수 있고, OH 농도와 O2 농도의 분포로 보아 prompt NO 생성의 근거가

되고 있다. 연료Counter-swirl조건의 강난류에 의해 예혼합이 촉진되어 집약적으로 연소반응이 일어나는 것으로 생각되고, 이러한 강난류에 의해 화염대의 구조가 매우 복잡하게 되어 국소영역에서의 소염도 일어날 것으로 예상된다.

3.5 비연소장에서의 유동특성

연료스윙유동의 차이가 유동장의 난류특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열선유속계를 이용하여 평균속도와 난류강도 및 파워스펙트럼을 조사하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10는 유동축방향의 평균속도와 난류강도를 나타낸다. 평균속도의 최대값은 Counter-swirl의 경우 반경방향 13.5mm에서, Co-swirl의 경우 반경방향 15mm에서 나타나며 Counter-swirl조건에서 최대값이 30%정도 큰 값을 가진다. 난류강도 또한 그 최대값에 있어서 Counter-swirl조건이 30% 큰 값을 가진다. 여기서 주목할 점은 연료 Co-swirl조건과 비교할 때 Counter-swirl 조건에서 평균속도와 난류강도가 큰 값들이 중심축 가까이 존재한다는 것이다.

이와 같이 Counter-swirl 조건에서 화염의 중심부근에서 난류운동에너지가 큰 값이 나타나는

것을 볼 때 Co-swirl 조건에 비해 상대적으로 연료와 산화제의 혼합(mixing)이 촉진될 것을 예상할 수 있고 저NOx특성은 이러한 유동특성과 깊은 관계가 있다고 사료된다. Fig. 11은 접선방향의 난류강도분포를 나타낸 것으로 축방향과 유사한 경향을 보인다. Fig. 12는 축방향 상대난류강도를 나타낸다. 반경방향 15~17mm에서 상대난류강도가 최소가 되며 이 같은 결과를 볼 때 주된 혼합과정과 연소반응이 일어나는 것은 화염의 중심에서부터 상대난류강도가 최소값을 가지는 영역까지라는 것을 알 수 있다. 반경방향 17mm 이후구간에서는 난류강도가 점성에 의해 소멸되는 것보다 평균속도가 더 빨리 감소하기 때문에 상대난류강도가 갑작스럽게 증가한 것으로 사료된다.

Fig. 13 및 Fig. 14는 공기스윙 60° 조건에서 유동축방향 평균속도와 난류강도가 최대값을 가지는 위치에서의 연료 Co-swirl(60°) 조건과 연료 Counter-swirl(-60°) 조건에서의 파워스펙트럼을 나타낸다. 파워스펙트럼의 기울기 -5/3를 만족함을 볼 때 Co-Counter swirl 조건 모두 1kHz 이내에서 관성아영역(Initial subrange)을 벗어나 충분히 발달한 난류임을 알 수 있으나

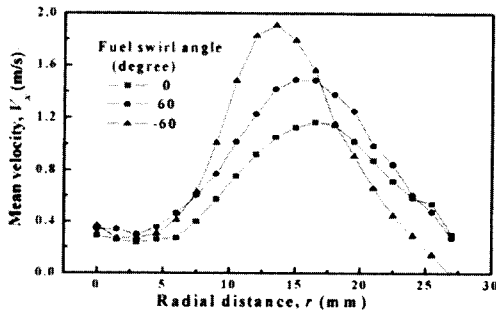


Fig. 9. Mean velocity at air swirl 60° condition

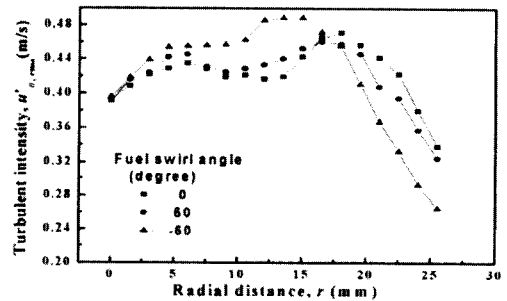


Fig. 11. Turbulent intensity at air swirl 60° condition

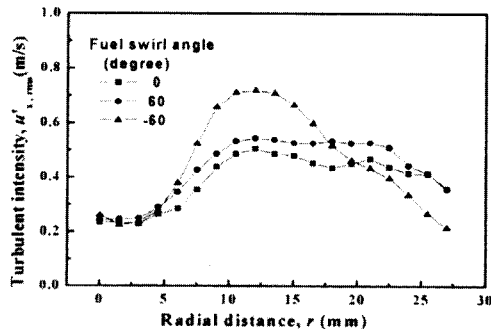


Fig. 10. Turbulent intensity at air swirl 60° condition

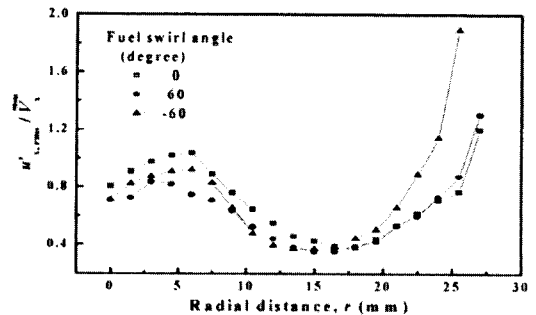


Fig. 12. Relative turbulent intensity at air swirl 60° condition

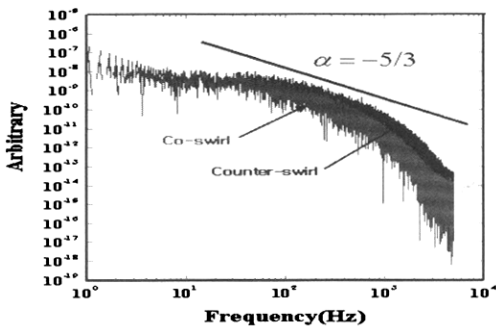


Fig. 13. Powerspectrum at maximum mean velocity region

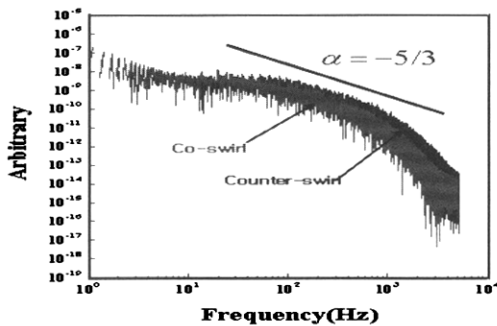


Fig. 14. Powerspectrum at maximum turbulent intensity region

Counter-swirl 조건이 상대적으로 고주파 영역까지 높은 에너지를 가지고 있음을 알 수 있다. 이 같은 높은 에너지가 연료와 산화제의 혼합의 촉진에 기여할 것으로 사료된다. 이러한 혼합의 촉진으로 화염은 예혼합화염에 가까운 형태로 연소되고, 복잡해진 화염대의 국소영역에서 소염현상도 예상된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 스윙연소기에서 연소기 노즐부의 공기와 연료측 스윙각의 변화에 따른 연소특성을 실험을 통해 조사하였다.

실험조건에서 공기의 분출 속도가 연료에 비해 상당히 큰 결과로 인해 전체 NOx 배출에 있어서는 연료스윙 보다 공기스윙에 의한 영향이 크게 나타났다. 공기스윙이 강하고 연료 Counter-swirl 조건일 때가 Co-swirl 조건보다 화염의 고온 영역이 상대적으로 좁게 분포하면서 최고 온도에서는 큰 차이를 보이지 않아 Thermal NOx의 저감 가능성을 확인 할 수 있었다. 또한 화염중심에 가까운 영역에서 큰 평균속

도와 난류강도의 특성을 보이고 있으며 상대적으로 고주파 영역까지 높은 에너지를 가지고 있음을 확인해 볼 때 연료와 산화제의 혼합(mixing)의 촉진도 예상가능하며 CH*, OH* 화학발광강도와 O₂농도측정 결과로부터 Prompt NO의 저감 가능성도 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 볼 때 스윙연소기에서 연료측의 Counter-swirl을 이용한 저NOx 연소의 가능성을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 학술진흥사업의 지원에 의해 이루어졌음(2004-E-ID03-P-02 -0-000)

참고문헌

- 1) Durbin, M. D., and Ballal, D. R., " Studies of Lean Blowout in a Step Swirl Combustor", *Transactions of the ASME*, Vol. 118, 1996, pp.72~77.
- 2) Durbin, M. D., Ballal, D. R. and Katta V. R., " Study of Flame Stability in a Step Swirl Combustor", *Transactions of the ASME*, Vol. 118, 1996, pp.308~315.
- 3) Coghe A., Solero G., and Scribano, G., " Recirculation phenomena in natural gas swirl combustor", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, 2004, pp.709~714.
- 4) Takashi, T., and Shingeru, S., " The Effect of Fuel-Air Mixing on NOx Formation in Non-Premixed Swirl Burners", *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 1996, pp.2733~2739.
- 5) Hillemans, R., Lenze, B. and Leuckel, W., " Flame Stabilization and Turbulent Exchange in strongly swirling natural gas flames", *Twenty-first Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 1986, pp. 1445-1453.
- 6) Xue, H., and Aggarwal, S. K., " NOx emissions in n-heptane/air partially premixed flames", *Combustion and Flame*, Vol. 132, 2002, pp. 723~741.
- 7) Miller, J. A. and Bowman, C. T., " Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 15, 1989, pp. 287~338.