

싸이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소기의 NO_x 및 CO 배출특성

김중현* · 이현용** · 황철홍*** · 이장언****†

NO_x and CO Emission Characteristics of Premixed Oxidizer-staging Combustor using a Cyclone Flow

Jong-Hyun Kim, Hyun-Yong Lee, Cheol-Hong Hwang and Chang-Eon Lee

ABSTRACT

The aim of this work is to identify application of ultra low NO_x and CO combustor. To achieve this, we developed the premixed oxidizer-staging combustor using a cyclone flow. Various factors such as equivalence ratio for the combustion condition and swirl type for secondary air injection have been tested experimentally for flame stability and NO_x, CO emission characteristics. Before to do this, we had been tested cyclone premixed combustor in advance. it is similar to first combustor of premixed oxidizer-staging combustor. As a result, cyclone premixed flame shows the very high flame stability and low NO_x emission. however, it can be identified that there were some problems such as a little high CO emission and thermal resistance of combustor wall. Cyclone premixed oxidizer-staging combustor can resolve those of problems. In our combustor, we can found out optimal condition that the secondary air injection method is swirl type, swirl direction is co-swirl and equivalence ratio of first combustor is 1.3. Quantitatively, we can achieve 10.8 ppm for NO_x and 30.2 ppm for CO emissions respectively. Form this result, we can identified that cyclone premixed oxidizer-staging combustor can apply to ultra low NO_x and CO combustor.

Key Words : Premixed Oxidizer-Staging Combustor, Cyclone Flow, Flame Stability, NO_x Emission, CO Emission

1. 서 론

화석 연료의 연소시 발생하는 배출가스는 대기오염의 주범으로 지구온난화, 산성비, 스모그 현상과 같은 해결해야할 많은 문제점을 안겨주고 있다. 이러한 대기오염 물질 중에서 NO_x는 산성비나 광화학 스모그(Photochemical smog)의 원

인이 되어 인체에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 이에 NO_x 발생을 감소하기 위한 다양한 방법들이 강구 되고 있으며, 기존의 방식으로는 재연소 방식(Reburning process), 산화제 다단 방식(Oxidizer staging), 배가스 재순환 방식(FGR) 등이 제안되고 있다.

또한 최근 보일러 및 가스터빈 등을 비롯한 실용 연소기에서 당량비 조절을 통한 화염온도를 감소시켜 NO_x 배출 농도를 저감시킬 수 있는 예혼합 연소방식을 적용한 연소기가 개발되고 있다.[1,2,3] 그러나 예혼합 연소방식의 경우 확산연소방식에 비해 화염안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있으며 이를 개선하기 위한 다양한 방법들이 강구되고 있다.

* (주)화성테크윈

** 인하대학교 기계공학과 대학원

*** NIST(USA)

**** 인하대학교 기계공학과

† 연락처, chelee@inha.ac.kr

확산연소방식을 적용한 실용연소기의 예로 축방향의 연료노즐 주위로 선회 공기를 공급하여 내부 재순환 영역을 형성시켜 연료 및 공기의 혼합을 촉진하고, 고온 연소생성물의 재순환을 통하여 화염을 안정화시키는 동시에 NOx를 저감시키는 선회연소기가 개발되고 있다.[4,5]. 그러나 기존의 선회연소기는 화염 안정성을 고려하여 이와 같이 대부분 확산 연소방식을 채택하고 있으며, 이로 인하여 NOx, CO, Soot과 같은 오염물질의 저감에 한계를 가지고 있다.

이를 개선하기 위한 연구로서, McClaine 등[6]은 접선방향의 예혼합 노즐을 통한 사이클론 유동을 이용한 결과 NOx 발생이 감소됨을 확인하였으며, Ishizuka 등[7]은 접선방향의 예혼합 연료노즐을 배치한 Tubular Flame Burner를 이용하여 화염 신장 효과와 연소장내의 예혼합 분위기를 조성하여 NOx 저감을 시도한 바 있다. 또한 Hoshino 등[8]과 Yamamoto 등[9]은 확산 연소방식에서 다수의 동축 연료노즐을 설치 전체적인 연소장 분위기를 예혼합으로 조성함과 동시에 예혼합 가스에 선회를 발생시켜 화염안정성을 개선시키고 NOx를 저감하는 연소기를 제안한 바 있다.

이와 같이 현재 실용연소기에서 NOx 저감을 위한 다양한 시도들이 행해지고 있으나, 화염안정성이 유지되면서 초저 NOx를 달성하기 위한 연소기를 개발하기 위해서는 위에서 언급한 NOx 저감법을 단독으로 쓰기 보다는 모든 저감법들을 유기적으로 동시에 적용하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 먼저 화염안정성 개선 및 NOx, CO 배출을 저감시키기 위하여 사이클론 유동을 이용한 예혼합 연소기를 설계하였다, 즉 예혼합 가스를 4개의 접선방향 노즐을 통해 연소실에 분사함으로써 근접 화염들 간의 상호 보염 작용을 유지하도록 하였으며, 이렇게 안정된 화염에서 난류강도를 높임으로써 NOx 저감을 기대할 수 있도록 하였다. 또한 사이클론 예혼합 연소기의 CO 배출성능의 단점을 보완하면서 NOx 저감효과를 더욱 증대하기 위해 산화제 다단 연소방법이 추가된 사이클론 예혼합 다단연소기를 제안 하였으며, 다단연소 효과로 인한 NOx 저감을 기대할 수 있도록 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

2.1.1 사이클론 예혼합 다단연소기

Fig. 1은 본 연구에서 설계한 사이클론 예혼합 다단연소기의 개략도이다. 연소기는 LNG 연료를 대상으로 20,000 kcal/hr의 용량을 갖도록 설계되었으며, 산화제 다단연소의 개념을 적용하여 1단 연소부와 주연소부인 2단 연소부에 공기량을 조절하여 분배할 수 있도록 고려하였다. 혼합기 노즐은 그림과 같이 1단 연소부 외통 하부에 접선방향의 4개 노즐이 설치되었으며, 노즐에서 분사되는 예혼합 가스는 연소기 내부 벽면을 따라 Vortex 형태의 화염을 형성하게 된다. 또한 각 노즐의 예혼합 선회 화염은 근접 화염에 점화원 역할을 하게 함으로서 화염 안정성을 극대화 하였다.

연소기는 크게 1단 연소부(1단 혼합기 노즐, Water jacket, 1단 출구)와 2단 연소부(2단 공기 선회기)로 구성 되어 있으며, 이들 구성요소는 최적화된 설계인자를 도출하기위해 각 구성품을 자유롭게 교체할 수 있도록 구성 하였다. 2단 연소실은 내경 300mm, 길이 1000mm이며, 75mm 두께의 단열재를 사용하여 외부의 영향을 최소화 되도록 하였다.

2.1.2 실험장치

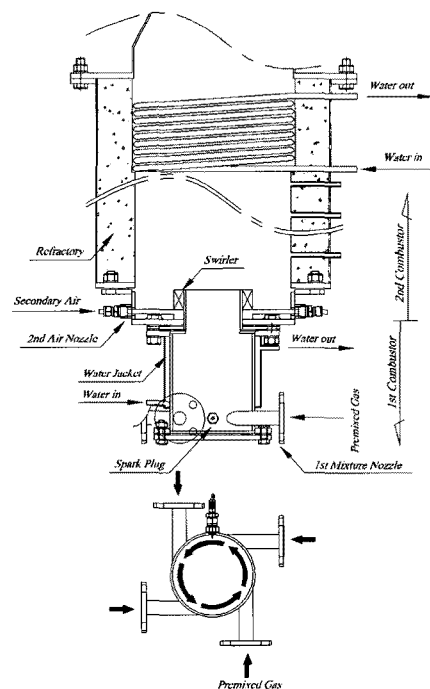


Fig. 1 Schematic diagram of combustor

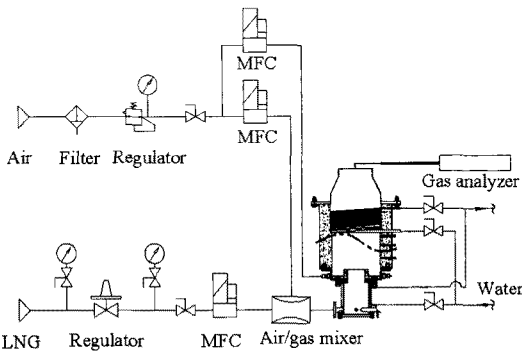
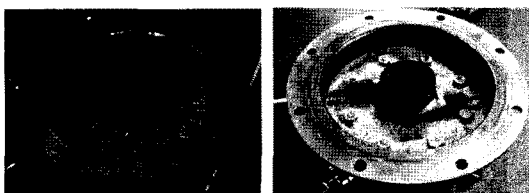


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental flow and measurement system.

Fig. 2는 연료 및 공기를 공급하기 위한 유로계 및 측정시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 연료와 공기는 습식가스미터(Ritter, TG20)로 보정된 후 질량유량계(MFC)를 이용하여 제어된 후 연소실에 공급된다. 배기가스는 충분한 거리의 화염 후류에서 반경방향으로의 농도변화의 오차가 ±2% 미만인 범위에서 포집하여, 수분 및 응축수자동제거 콜러를 내장한 Electrochemical 방식의 가스분석기(Eurotron, GreenLine 9000)를 사용하여 NOx, CO 및 THC(Total hydrocarbon) 농도를 측정 하였다. 본 연구의 모든 실험에서 배기가스 농도는 O₂ 4%를 기준으로 환산하였다.

2.1.3 실험조건 및 방법

Table 1은 본 연구의 실험조건을 나타낸 것이다. 용량 20,000 kcal/hr의 연소기를 대상으로 1단 연소실로 공급되는 예혼합가스의 당량비인 1단연소부 당량비 및 2단 공기의 증감에 의해 제어할 수 있는 총괄 당량비 변화에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 검토하였다. 또한 2단공기의 분사방식은 1단 연소실에서 발생한 미연생성물과의 혼합에 상당한 영향을 줄 것으로 판단되며, 결과적으로 NOx와 CO 배출량에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.



(a) Nozzle type (b) Swirl type

Fig. 3 Types of secondary air Injection

Table 1 Experimental condition

용 량	20,000 kcal/hr
1단 당량비	1.1~1.8
총괄 당량비	0.80~0.95
선회각(선회수)	45°(0.93)
1단 노즐직경	9 mm
2단 선회기면적	2827 mm ²

따라서 본 연구에서는 최적의 2단 공기 분사방식을 결정하기 위해 2가지 타입의 2단 공기 분사 방식에 대한 실험을 수행하였다. 즉 노즐타입과 선회타입에 대한 검토가 이루어 졌다.

Fig. 3(a)는 노즐타입의 공기 분사방식에 대한 사진을 나타낸 것으로 8개의 수직 노즐로 구성되었다. Fig. 3(b)는 선회타입 공기 분사방식에 대한 사진을 나타낸 것이다. 선회타입의 경우 추가적인 변수로서 선회방향에 대한 검토가 이루어 졌으며, 1단 연소부에서 생성된 Vortex 화염의 회전방향과 동일한 선회방향인 순방향(Co-swirl)과 반대방향인 역방향(Counter-swirl)을 갖도록 2가지 선회타입 노즐을 제작하였다.

또한 1단 연소부 및 2단 연소부의 열손실에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 검토하기 위하여 1단 연소부에는 Water jacket을 2단 연소부 하부에는 수관형 코일을 각각 설치하여 수냉방식에 의한 냉각을 수행하여 열손실에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 검토하였다. 또한 본 실험의 화염안정영역 측정은 Blowout이 발생하는 순간의 혼합기 유량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 싸이클론 예혼합 연소기의 성능검토

싸이클론 예혼합 다단연소기의 NOx 및 CO 배출특성을 검토하기 이전에, 1단 연소부에서 싸이클론 유동을 이용한 예혼합화염의 안정성 및 오염물질 배출특성에 대한 성능이 먼저 검토되었다. 이를 위해 Fig. 1의 예혼합 다단연소기의 1단 연소부에 해당하는 개별 싸이클론 예혼합 연소기(5000 kcal/h)를 따로 제작하였으며, 접선방향 혼합기 공급노즐은 먼저 2개만을 설치하여 화염 안정성에 대한 검토가 이루어 졌다.

Fig. 4는 싸이클론 예혼합 연소기의 화염안정영역을 부하량과 총괄당량비로 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 부하량이 증가함에 따라 연료 과농 조건(Rich-limit)에서의 화염안정영역

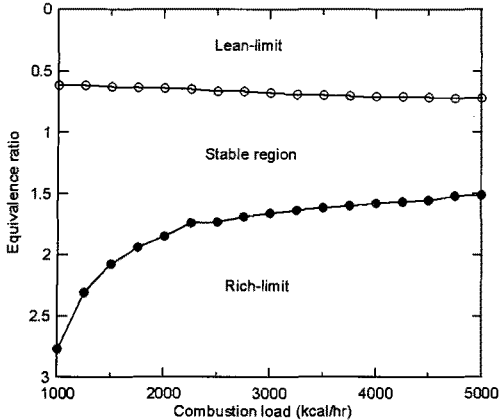


Fig. 4 Flame stable region of cyclone premixed combustor

은 감소하지만, 약 2,500 kcal/h 이상의 부하량에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 연료 회박 조건(Lean-limit)에서는, 모든 부하량에 대해 총괄 당량비 0.7까지 안정한 화염이 형성됨을 알 수 있다. 실용 연소기에서 예혼합화염 적용시 가장 큰 어려움이 낮은 화염안정성임을 감안할 때, 본 사이클론 예혼합 연소방식은 매우 우수한 화염안정성을 보여주고 있다. 이는 각 노즐 출구에서 생성되는 선회화염이 근접한 노즐에서 분사되는 예혼합기의 화염을 안정화 시키는 보염 역할을 하기 때문이다.

Fig. 5는 사이클론 예혼합 연소기에서 난류강도의 영향을 살펴보기 위하여 각 노즐에 공급되는 혼합기의 유속(Swirl velocity)을 10 m/s 에서 50 m/s로 변화시킨 경우의 총괄당량비 변화에 따른 NOx 배출성능을 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 모든 혼합기 유속조건에서 희박한 영역으로 갈수록 화염온도 감소로 인하여 NOx 값이 크게 감소되고 있음을 알 수 있다. 비록 혼합기의 유속에 따른 뚜렷한 NOx 배출 경향은 관찰되지 않았으나, 실용연소기에서 일반적으로 적용되는 총괄당량비 0.9의 조건에서 NOx 값은 본 실험의 모든 혼합기유속에서 약 25 ppm 미만으로 매우 우수한 NOx 배출특성을 보여줄 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일 조건에서의 CO 배출성능을 나타낸 결과이다. 혼합기 유속이 40 m/s 이하 일 때, 당량비 0.7을 제외한 전 조건에서 약 40 ppm 이하의 다소 높은 CO 배출성능을 보여주고 있으며, 혼합기 유속이 50 m/s로 증가한 경우 상당히 많은 CO가 배출됨을 알 수 있다. 이와 같이 사이클론 예혼합 방식을 적용한 연소기의 경우, 대용량 실용 연소기로서의 적용을 고려할 때 화염안정성 및 NOx 배출성능은 우수하나, CO 배출에 대한 많은 문제점이 발생할 것으로

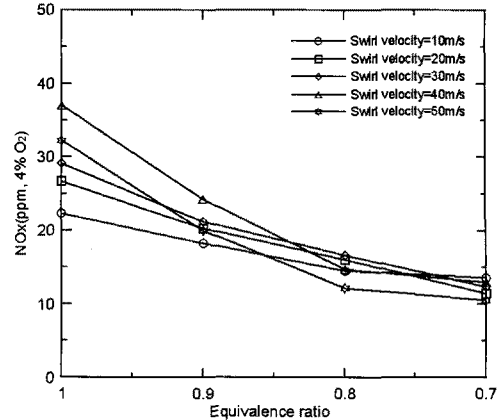


Fig. 5 NOx mole fraction according to swirl velocity in cyclone premixed combustor

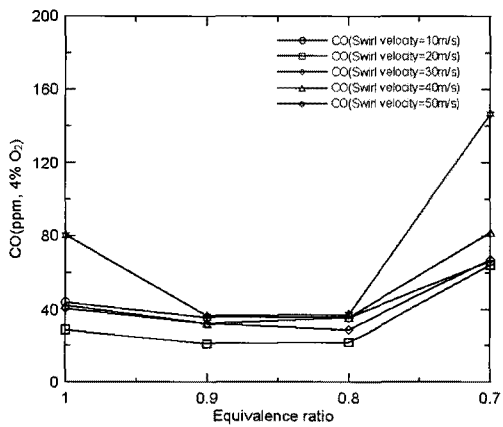


Fig. 6 CO mole fraction according to swirl velocity in cyclone premixed combustor

판단된다. 또한 당량비 0.9의 조건에서는 높은 화염온도로 인하여 연소기 벽면이 가열되는 내열·내구성 문제점을 확인 할 수 있었다.

이러한 실험결과를 바탕으로 사이클론 예혼합 방식의 높은 화염안정성 및 저 NOx 배출성능을 유지하면서, 높은 CO 발생량 및 내열성 문제를 해결할 수 있는 사이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소기를 제안하여 상세한 연소성능을 검토하였다.

3.2 사이클론 예혼합 다단연소기의 성능검토

사이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소기의 NOx 및 CO 배출성능에 대한 최적조건을 도출하기 위해, 본 연구에서는 먼저 2단 연소부의 공기 분사방식 그리고 1단 및 2단 연소부의 당량비 변화에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 검토 하였으며, 마지막으로 상용 연소기로서의 적용을 위하여 1단 및 2단 연소부 냉각에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 단계별로 검토하였다.

Fig. 7은 용량 20,000 kcal/h에 대하여 2단 연소부의 공기분사 방식(Fig. 3 참조)을 노즐타입과 선회타입으로 적용한 경우의 총괄당량비 0.9의 조건에서 1단 연소부의 당량비 변화에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 도시한 것이다. Fig. 7(a)의 노즐타입이 적용된 경우, 1단 연소부 전 당량비 범위에서 CO가 1000 ppm 이상 발생함을 알 수 있다. 이는 2단 연소부로 공급되는 공기가 1단 연소부에서 발생하는 미연생성물과 충분한 혼합이 이루어지지 않아 불완전 연소가 발생하기 때문이며, 이때 배출되는 NOx는 상당히 낮은 발생량을 보이지만, 불완전 연소로 인해 실용적 측면에서 의미가 없음을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 선회타입을 적용한 경우로, 선회타입의 또 다른 변수인 선회방향은 역방향인 조건에 대한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 1단 연소부 전 당량비 범위에서 CO는 10 ppm 이하이며, NOx는 40 ppm 미만의 배출성능을 보여 주고 있다. 특히 1단 연소부 당량비 1.3의 경우 NOx는 약 15 ppm으로 매우 우수한 배출성능을 보여 주고 있음을 알 수 있다. 위 결과로부터 NOx 및 CO 배출성능에 선회타입의 2단연소부 공기분사 방식이 우수함을 확인할 수 있었다.

또한 위에서 언급한 선회타입의 또 다른 변수인 선회방향(Counter-swirl 및 Co-swirl)에 대한 검토가 이루어 졌다.

Fig. 8은 선회방향에 따른 화염안정영역을 부하량과 1단 연소부의 당량비에 대하여 도시한 것이다. 이때 화염안정영역은 2단 연소부에서만 화염이 형성되는 부분(Stable flame zone)과 1단 및 2단 연소부 모두에서 화염이 형성되는 부분(Stable flame and staged flame zone)으로 구분하여 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 선회방향은 Co-swirl이 Counter-swirl보다 화염안정영역이 더 우수함을 알 수 있다.

Fig. 9는 용량 20,000 kcal/h에 대하여 선회방향에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 총괄당량비 및 1단연소부 당량비에 대하여 도시한 것이다. CO 배출의 경우, 총괄당량비 0.95를 제외하고 모든 조건에서 선회방향에 관계없이 20 ppm 이하의 매우 우수한 배출성능을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 NOx 배출은 총괄 당량비 변화에 대해서는 큰 차이를 보이지 않지만, 1단연소부 당량비 변화에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 선회방향이 Counter-swirl인 경우, 1단연소부 당량비 1.2~1.4의 조건에서 비교적 낮은 NOx 배출량을 보이고 있으며 약 15 ppm의 최저 NOx가 배출됨을 알 수 있다. 선회방향이 Co-swirl의 경우, 전체적인 NOx 배출성능은 Counter-swirl과 큰 차이를 보이지 않지만, 1단연소부 당량비 1.3에서 10 ppm의 최저 NOx 배출성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

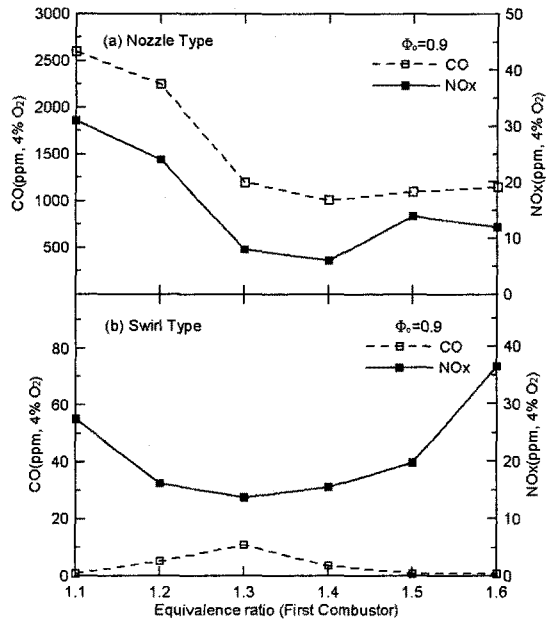


Fig. 7 NOx and CO mole fraction with types of secondary air injection in cyclone premixed combustor

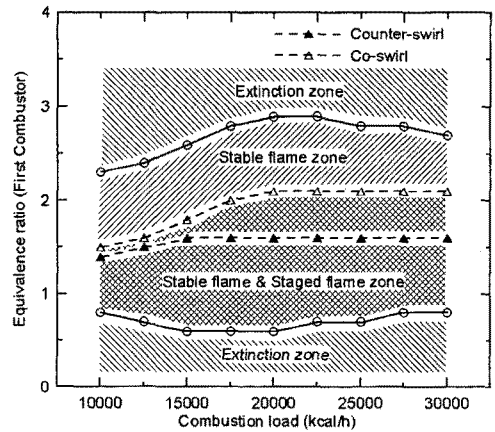


Fig. 8 Flame stable region of cyclone premixed staging combustor

이와 같이 싸이클론 예혼합 다단연소기의 화염안정성 및 NOx, CO 배출성능을 검토한 결과, 선회방향으로는 Co-swirl이, 1단연소부 당량비는 1.3의 운전조건에서 최적의 배출성능을 보임을 알 수 있다.

일반적으로 실용연소기의 경우, 화염대에서 생성된 NOx 및 CO는 대기로 배출 되는 과정에서 열교환기 또는 작업공정을 거치면서 열손실에 따른 추가적인 NOx 및 CO의 생성 및 소멸 반응을 동반하게 된다. 이와 같은 관점에서 1단 및 2단 연소부의 열손실에 따른 NOx 배출특성에 대

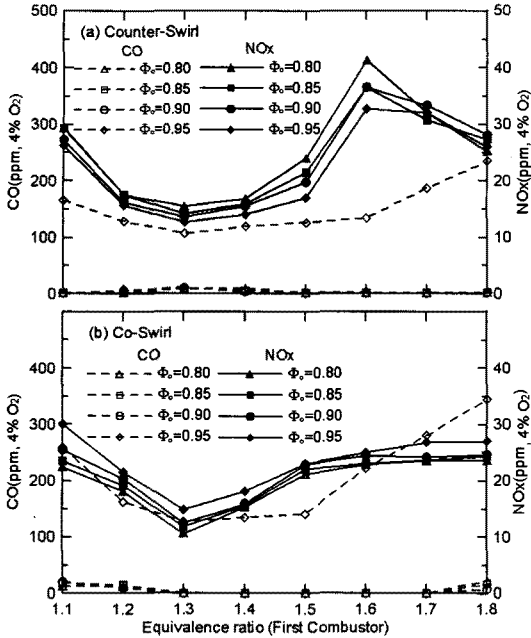


Fig. 9 NOx and CO mole fraction according to overall equivalence ratio and swirl direction in cyclone premixed staging combustor

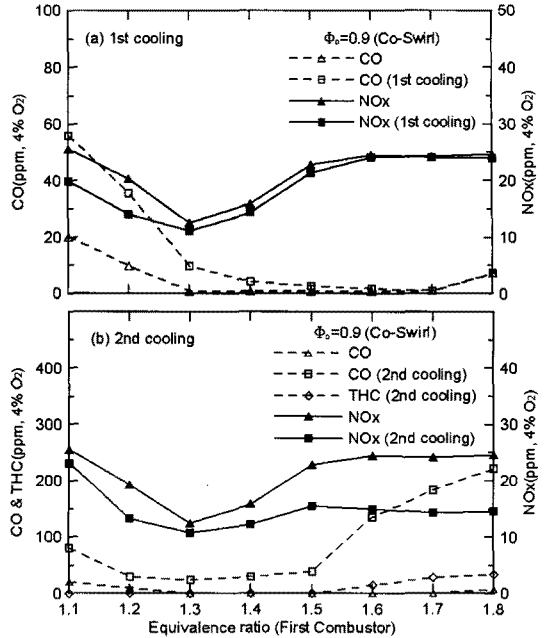


Fig. 10 NOx and CO mole fraction according to cooling in cyclone premixed staging combustor

한 이해는 실용연소기의 최적 설계 및 열교환기의 성능 및 배치에 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

Fig. 10은 용량 20,000 kcal/h에 대하여 1단 및 2단 연소부 냉각에 따른 NOx 및 CO 배출성능을 도시한 것이다. 비록 연소기 벽면에서 정확한 열전달량을 측정하지는 않았지만, 모든 조건에서 냉각을 위한 물의 입·출구 유량은 동일하게 설정하였다.

Fig. 10(a)의 1단연소부 냉각의 경우, 1단연소부 당량비가 증가함에 따라 NOx 저감효과가 점차 감소함을 알 수 있다. 이는 1단연소부 당량비가 커짐에 따라 1단 연소부보다 2단 연소부에서 더 많은 연소가 이루어짐으로서 1단 연소부에서는 냉각으로 인한 화염온도의 감소율이 작아지기 때문으로 사료된다.

Fig. 10(b)의 2단연소부 냉각의 경우, 최적 운전조건인 1단연소부 당량비 1.3에서 NOx 10.8 ppm, CO 30.2 ppm으로 매우 우수한 오염물질 배출성능을 보여주고 있으며, 초저 NOx 실용연소기 개발에 대한 싸이클론 예혼합 다단연소기법의 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 화염안정성 개선 및 NOx 및

CO 배출을 저감시키기 위하여 싸이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소 방식을 제안하였으며, 화염안정성 및 오염물질 배출특성에 영향을 미치는 다양한 인자들을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 싸이클론 예혼합 연소기에 대한 선행실험을 통하여 싸이클론 예혼합 유동 방식은 화염안정성 및 NOx 배출성능 측면에서 매우 우수함을 확인하였다. 그러나 실용연소기의 관점에서 다소 높은 CO 배출 및 연소기의 내열성 문제는 해결해야 할 과제로, 이를 위해 싸이클론 유동을 이용한 예혼합 다단연소 방식을 적용한 연소기를 제안하였다.
2. 싸이클론 예혼합 다단연소기의 NOx 및 CO 배출성능에 영향을 미치는 다양한 인자들을 검토한 결과, 2단 공기 분사방식으로는 선회타입이, 이 선회기의 선회방향은 CO-Swirl이, 1단 연소부 당량비는 1.3이 최적 운전조건임을 확인하였다. 또한 실용연소기로의 적용을 위해 1단 및 2단 연소부의 열손실에 따른 배출성능을 검토한 결과 우수한 NOx 및 CO 배출성능을 보임을 알 수 있었다.
3. 본 연구를 통해 싸이클론 예혼합 다단연소 기법을 이용한 초저 NOx 실용연소기 개발에 대한 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지자원기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Lee, C. E., Oh, C. B., Kim, J. H., "Numerical and experimental investigations of the NOx emission characteristics of CH4-air coflow jet flames," *Fuel*, Vol. 83, 2004, pp. 2323-2334.
- [2] Lefebvre, A. H., "The role of fuel preparation in low emission combustion," *ASME J. ENG. Gas Turbine Power*, Vol. 117, 1995, pp. 617-654.
- [3] Bradley, D., Gaskell, P. H., Gu, X. J., Lawes, M. and Scott, M. J., "Premixed turbulent instability and NO formation in a lean-burn swirl burner," *Combust. Flame*, Vol. 115, 1998, pp. 515-538.
- [4] Douglas Feikema, Ruey-Hung Chen, and James F. Driscoll, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combust. and Flame*, 1990, pp. 183-195.
- [5] Syred, N., Chigier, N. A., Beer, J. M., "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl," *13th Symposium(int.) on Combustion, The Combustion Institute*, 1971, pp. 617-624.
- [6] Andrew McClaine "VISTa Combustor for Very Low NOx Emission in Furnaces and Boiler" Fall International Symposium of the American Flame Research Committee, San Francisco, 1999
- [7] Satoru Ishizuka, Tetsuya Motodamari, Daisuke Shimokuri "Rapidly mixed combustion in a tubular flame burner" *Proc. Combust. Inst.* Vol. 31, 2007, pp. 1085 - 1092
- [8] Yasushi Hoshino, Masaharu Morikawa, Susumu Noda and Yoshiaki Onuma, "Premixing Combustion of Fuel Spray by a Cyclone-Jet Combustor," *Proceedings of the 39th Japanese Symposium on combustion*, 2001, pp. 485-486.
- [9] Kazuhiro Yamamoto, Yasuki Nishizawa, Hirokazu Takeda and Yoshiaki Onuma, "Reaction Zone Thickness of Turbulent Premixed Flame," *Proceedings of the 39th Japanese Symposium on combustion*, 2001, pp. 7-8.
- [10] Ruey-Hung Chen, James F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flame Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters. " *23th Symposium(int.) on Combustion, The Combustion Institute*, 1990, pp. 281-288.
- [11] H. Y. Wang, V. G. McDonnell and G. S. Samuelsen, "The Two-Phase Flow Downstream of a Production Engine Combustor Swirl Cup," *Twenty-fourth Symposium on Combustion*, 1992, pp. 1457-1464.