

하이브리드 사이클론 제트 연소기의 연소특성에 관한 연구

정원석* · 황철홍* · 이규영** · 이창언***

A Study on the Combustion Characteristics of a Hybrid Cyclone Jet Combustor

Won-Suk Jung*, Chul-Hong Hwang*, Gyou-Young Lee** and Chang-Eon Lee***

ABSTRACT

A promising new approach to achieve low pollutants emission and improvement of flame stabilities is tested experimentally using a hybrid cyclone jet combustor employing both premixed and diffusion combustion mode. Three kind of nozzles are used for LNG(Liquified Natural Gas) as a fuel. The combustor is operated by two method. One is ATI(Air Tangential Injection) mode, generated swirl flow by air as general swirl combustor, and the other is PTI(Premixed gas Tangential Injection) mode. The PTI mode consists of diffusion flame of axial direction and premixed cyclone flame of tangential direction in order to stabilized the diffusion flame. The results showed that the stable region of the PTI mode is more larger than the ATI mode. In addition, the reduction of NOx emission in PTI mode, as compared with that for the ATI mode is at least 50% in stable region. Also, even using the low calorific fuel as CO₂-blended gas, the cyclone jet combustor has high performance of flame stability.

Key Words : Cyclone Jet Combustor, Swirl Combustor, Flame Stability, NOx Emission

1. 서 론

최근에 산업공해 및 대기오염에 관한 환경규제의 강화로 인하여 저공해 및 고효율 연소기 개발에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 실용연소기에 적용되는 선회화염은 축방향의 연료노즐 주위로 공기에 의한 선회류가 공급되어, 중앙 재순환 영역을 생성시킨다. 이는 연료 및 공기의 혼합을 촉진하고, 고온 생성물의 재순환을 통해 화염을 안정화시키는 동시에 NOx를 저감하는 역할을 수행한다고 알려져 있다[1, 2]. 그러나 기존의 선회연소기는 화염 안정성을 고려하여 대부분 확산 연소방식을 채택하고 있으며, 이로 인하여 NOx, CO, Soot과 같은 오염물질의

저감에 많은 한계를 가지고 있다.

NOx 발생을 감소하기 위한 기존의 방법으로는 재연소(Reburn), 다단연소(Staged Combustion), 배가스 재순환(EGR) 등이 제안되고 있으며, 근본적으로 연소장 내의 공연비, 화염온도, 체류시간, 화염면의 신장(Stretch) 등에 그 원인을 찾아볼 수 있다[3]. 이들에 관한 연구로서, Kim 등[4]은 CH₄-Air 동축화염을 대상으로 당량비 변화에 따른 NOx 생성특성을 통해 확산화염에 비해 예혼합 화염에서 NOx 발생이 매우 적음을 보고하였으며, Chen 등[5]은 화염면의 신장으로 인하여 화염온도와 체류시간이 감소되어 NOx 발생이 저감됨을 확인하였다. 결과적으로 오염물질의 발생을 저감하기 위한 예혼합 연소와 화염안정성을 위한 확산 연소방식을 적절히 조합하는 하이브리드(Hybrid) 개념의 신 연소기 설계가 요구되어진다. 이러한 개념을 실용연소기에 적용한 최근의 사례로는 Yetter 등[6]에 의해 접선방향의 공기노즐 입구에 연료 노즐을 배치함으로써, 공기의 강한 선회로 인한 화염의 신장과 연소장의

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하전문대학 자동차공학과

*** 인하대학교 기계공학과

† 연락처자, E-mail : chelee@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7323

예혼합 분위기를 통해 NOx 저감을 시도한 바 있다. 또한 Hoshino 등[7]과 Yamamoto 등[8]은 확산연소 방식에 의한 다수의 동축 연료 노즐을 통해 전체적으로 예혼합 분위기를 조성하였으며, 동시에 예혼합화염으로 선화를 발생시켜, 화염안정성을 개선시키고 NOx를 저감하는 연소기를 제안한 바 있다.

이러한 배경 하에 본 연구는 Hoshino 등이 제안한 연소방식을 일부 적용한 하이브리드 사이클론 제트 연소기(Hybrid Cyclone Jet Combustor)를 대상으로 화염안정성 개선과 오염물질 저감을 위한 최적 연소기 설계의 기초자료를 얻는데 목적이 있다.

2. 실험장치

본 연구에서 제안된 하이브리드 사이클론 제트 연소기는 Fig. 1과 같이 축방향의 내경 4mm 연료 노즐과 내경 20mm의 산화제 노즐 및 선회류를 생성시키기 위해 연료 노즐로부터 10mm 높이에 위치한 접선방향의 선회노즐로 구성되어있다. 일반 선회연소기와 사이클론 제트 연소기의 연소특성을 비교하기 위하여 선회노즐의 공급유체를 공기와 예혼합 가스로 구분하여 실험을 수행하였다. 먼저 선회노즐에 산화제인 공기를 분사하여 일반적인 선회화염을 형성하는 방식을 ATI(Air Tangential Injection)연소방식이라 하였다. 또한 선회노즐로 예혼합 가스를 분사하여 연소기 내부에 보염을 형성하여 축방향 확산화염의 안정성 향상을 도모하는 방식을 PTI(Premixed gas Tangential Injection)라 하였다. 연소기 내부는 보염에 의한 열화를 방지하기 위하여 ISOC-AST(RC18)의 분말형 내화재로 성형하여 제작하였고, 내경 및 높이는 각각 40mm, 35mm이며,

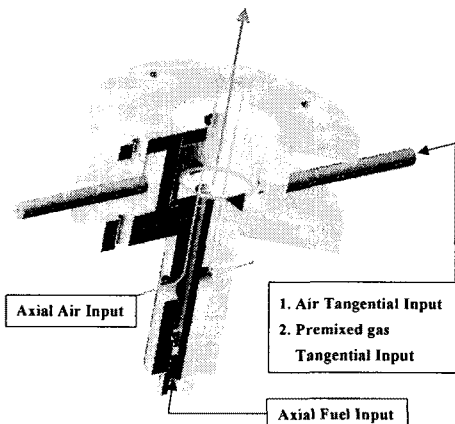


Fig.1 Schematics of the hybrid cyclone jet combustor.

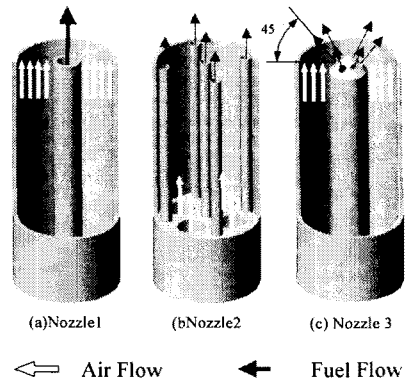


Fig. 2 Schematics of nozzles.

연소기 출구의 내경은 25mm로 하였다.

PTI 연소방식의 안정성을 더욱 개선하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 3가지 형상의 연료노즐에 대하여 실험을 수행하였다. Fig. 2에서 각 연료노즐 출구의 총 유효면적은 내경 4mm인 Fig. 2(a)와 동일하게 제작하였다. Fig. 2(b)는 5개의 연료노즐을 산화제 노즐에 배치하여 국부적인 확산화염을 전체적으로는 예혼합의 분위기를 구현하도록 설계하였으며, Fig. 2(c)는 45° 각도로 분사되는 다공 노즐의 개념을 적용하였다.

유로계는 연소기, 유량 제어 시스템, 공기 공급 시스템 등으로 구성되어 있으며, 개략도는 Fig. 3와 같다. LNG와 산화제인 공기의 유량제어는 버블유량계로 보정된 질량유량계(MFC Tylan FS 280 series, MFC Hi-Tec)를 이용하였다.

배기가스는 연소로 내 화염 후류와 충분한 거리를 두고 반경방향의 오차가 ±2% 미만인 범위에서 포집하였다. 포집된 가스는 Water trap을 통하여 수분을 제거한 후, Electro chemical 형의 가스분석기(Testo 350XL)를 사용하여 NO, NO₂, CO, O₂에 대하여 측정하였다. NOx는 NO와 NO₂의 합으로 나타내었으며, CO 및 NOx는 배기중의 O₂ 4%를 기준으로 환산하였다.

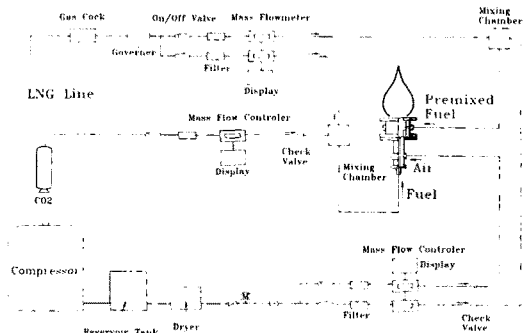
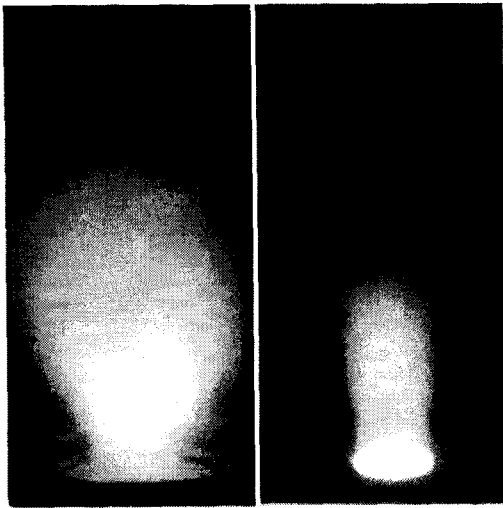


Fig.3 Schematics of the experimental apparatus.



(a) ATI mode (b) PTI mode
Fig.4 Direct photographs of flame shapes.

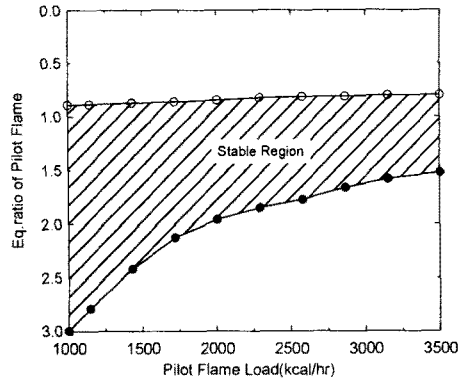
3. 결과 및 고찰

3.1 ATI와 PTI 연소방식에 따른 연소특성

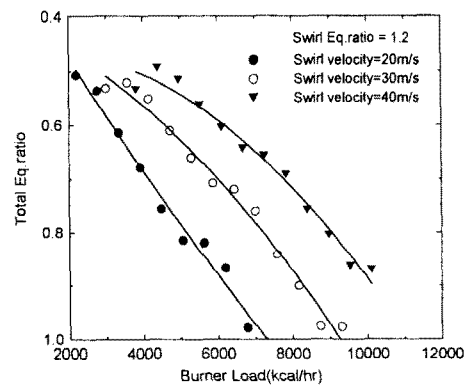
Fig. 4는 ATI와 PTI 연소방식의 대표적인 화염 형상을 나타낸 것으로 두 조건 모두 부하량은 5,000kcal/hr이고 총괄 당량비는 0.8인 조건이다. 또한 선회효과를 동일시하기 위하여 선회강도 즉 축방향에 대한 반경방향의 모멘텀이 동일한 조건에서 가시화 한 결과이다. 사진을 통해 PTI 연소방식이 ATI의 경우보다 화염면적이 매우 작으며, PTI 방식의 경우에 연소기 내부의 발광이 매우 큼을 볼 수 있다. 이는 ATI 연소방식은 모든 연료가 확산방식에 의해 연소되는 반면에 PTI 방식의 경우에는 총 연료량의 약 50%가 예혼합 화염의 형태로 내부에서 보염을 형성하기 때문이다. 이 결과를 통해 우선적으로 동일 부하량에 대해 PTI 연소방식이 기존의 선회화염과 유사한 ATI 방식에 비해 연소기의 규모가 Compact해질 수 있음을 짐작할 수 있다.

PTI 연소방식의 안정화 기구는 재순환 영역의 생성에 의한 영향 외에도 보염의 역할을 하는 예혼합화염의 선회에 의한 영향이 매우 크게 작용될 것으로 예측된다. 연소기의 안정성 개선을 위해서는 축방향 유동조건 변화에 무관하게 보염은 절대적으로 안정화되어야 한다. 이를 위해 우선적으로 독립적인 보염의 당량비 및 유속 변화로 인한 안정성에 대한 검토가 요구되어진다.

Fig. 5는 보염의 최적 유속 및 당량비를 결정하기 위하여 부하량과 총괄 당량비에 대한 안정화 특성을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 축방향 유동



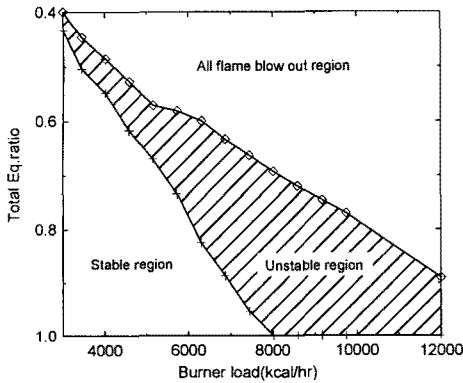
(a) Stable region of swirl flame.



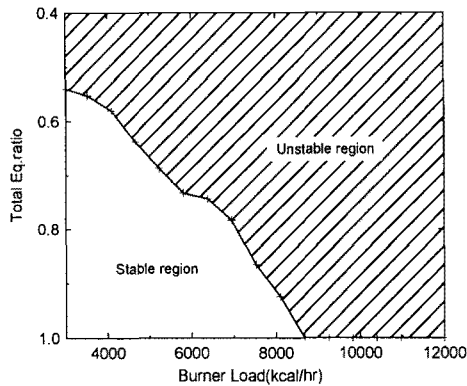
(b) Stable regions of swirl velocity.

Fig.5 Determination of optimum swirl velocity and equivalence ratio.

이 없는 상태에서 선회노즐을 통한 부하량과 당량비에 대한 안정화영역을 도식한 것이다. 보염은 부하량 증가에 관계없이 당량비 0.9~1.5 사이의 영역에서 항상 존재함을 알 수 있다. 또한 축방향 유동이 존재하는 경우에도, 보염 당량비가 1.1 이상이 되면 모든 조건에서 보염은 안정한 상태를 유지함을 확인하였다. 이 결과를 이용하여 Fig. 5(b)는 보염이 항상 안정한 조건인 당량비 1.2에서 선회유속의 변화에 대한 축방향 확산 화염의 안정성을 검토한 것이다. 선회속도가 20m/s에서 40m/s로 증가됨에 따라 안정화 영역은 크게 증가됨을 알 수 있는데, 이는 보염의 역할 외에도 선회유속의 증가에 따른 스웰강도의 증가에 의한 영향임을 짐작할 수 있다. 이 결과로 통해 본 연소기는 실용측면에서 고정된 부하량에 대하여 선회 예혼합 연소와 축방향의 확산 연소량의 적절한 선택을 통해 화염 안정화를 극대화시킬 수 있을 것으로 기대되어진다. 또한 Fig. 5(b)와 동일한 조건에서 보염의 당량비 변화에 대한 축방향 확산 화염의 안정성을 검토한 결과, 보염의 당량비가 축방향 확산 화염의 안정



(a) Stable regions of ATI mode.



(b) Stable regions of PTI mode.

Fig.6 Stable regions of nozzle1 with ATI and PTI mode.

성에 미치는 영향은 매우 작음을 확인하였다. 이는 난류화염의 안정성은 당량비 변화에 의한 영향보다는 선회도의 증가로 인한 난류강도의 변화에 더욱 큰 영향을 받기 때문으로 사료된다. 위의 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 안정화된 보염의 조건인 당량비 1.2와 유속 30m/s로 고정된 상태에서 모든 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 ATI와 PTI 연소방식에서 안정성의 차이점을 알아보기 위하여 연소기(Nozzle 1)의 전체 운전영역에서 안정화 영역을 당량비로 표시한 것이다. ATI 연소방식에서 점선방향으로 분사되는 공기량은 PTI 연소방식의 예혼합기 질량유량과 동일하게 공급하였다. 그림에서 Unstable region은 화염이 간헐적으로 부상되거나 재부착을 반복하는 상태를 의미한다. ATI와 PTI 연소방식에 의한 화염 안정영역을 비교해 보면 전체적으로 큰 차이를 보이지 않지만, PTI 방식의 경우가 안정화 영역이 미소하게 적음을 알 수 있다. 이는 PTI 연소방식에서 보염이 Nozzle 1과 같은 단일 노즐에서 생성되는 축방향 확산화염의 안정화 개선에 기여하지 못하기 때문으로 사료된

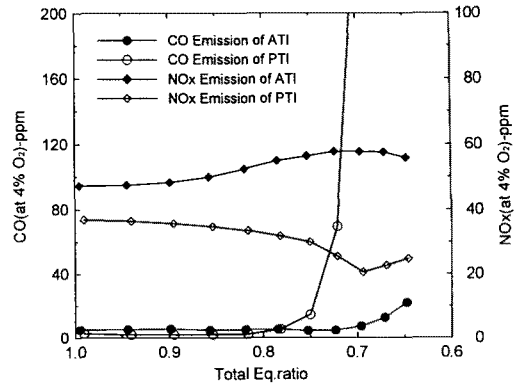


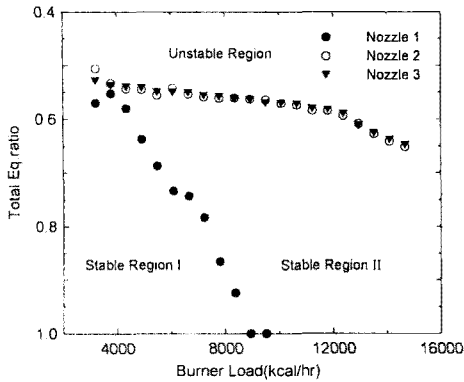
Fig.7 Emission characteristics for both ATI and PTI mode for nozzle 1 at 5,000 kcal/hr.

다. 또한 ATI와 PTI 연소방식 모두 점선방향으로 동일한 유량이 공급되어 유사한 초기 선회도를 갖게 되지만, PTI 방식의 경우에는 화염에 의한 점성의 증가로 난류강도의 감소가 초래되어 결과적으로 선회효과를 저감시킴을 짐작할 수 있다. 그러나 ATI 연소방식의 경우는 연소부하가 증가될수록 Blowout영역이 증가하나, PTI 방식의 경우는 항상 안정된 보염에 의해 모든 운전조건에서 Blowout 현상은 발생되지 않는 장점을 가지고 있다.

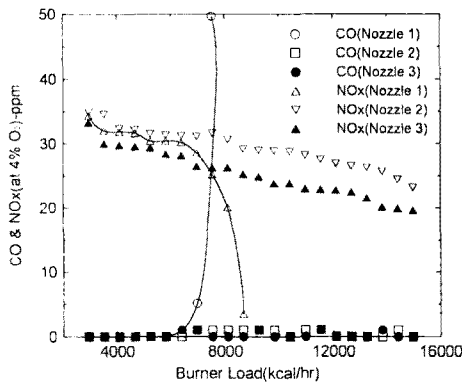
Fig. 7은 ATI와 PTI 연소방식에서 총괄 당량비에 대한 NOx와 CO의 배기특성을 나타낸 것으로 이때 총 부하량은 5,000kcal/hr로 고정하였다. CO가 거의 배출되지 않는 안정영역에서 총괄 당량비가 감소할수록 PTI 방식이 ATI 방식보다 NOx의 배출이 현저히 감소하는 것을 알 수 있으며, 특히 총괄 당량비가 0.75 부근에서는 NOx의 배출량이 약 50% 정도로 감소되는 것을 확인할 수 있다. CO는 안정영역에서 두 연소방식 모두 미소하게 발생되나, PTI 방식이 ATI 방식보다 CO의 발생량이 작음을 볼 수 있다. 즉 PTI 방식에서는 연료의 일부분을 예혼합 방식으로 연소시키기 때문에 ATI 방식에 비해 CO와 NOx의 발생량이 크게 감소함을 예측할 수 있다.

3.2 PTI 연소방식에서의 노즐 형상변화에 따른 연소특성

PTI 연소방식에서 Nozzle 1이 적용된 경우에는, ATI 방식에 비해 NOx와 CO 저감효과는 크지만, 안정성 면에서 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이는 축방향의 단일 노즐에서 연료가 분사되어 주위 유체와의 혼합이 작으며, 결과적으로 점선방향으로 분포되는 보염과의 상호작용이 미소하기 때문이다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, 연료노즐의 총 유효면적은 Nozzle 1과 같으면서



(a) Stable regions for three kind of nozzles.



(b) Emission characteristics for three kind of nozzles.

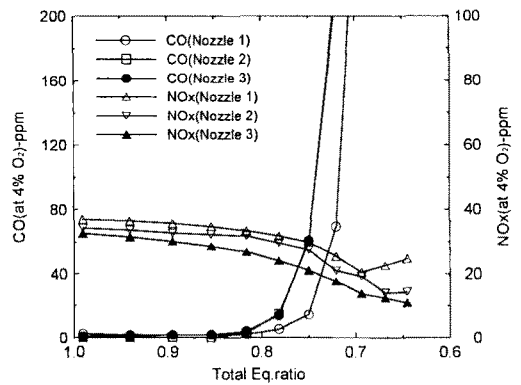
Fig.8 Stable regions and emission characteristics for three kind of nozzles.

다수의 노즐과 다공 노즐의 개념을 적용하여 연소기 내에 연료의 혼합도를 증가시키는 실험을 수행하였다.

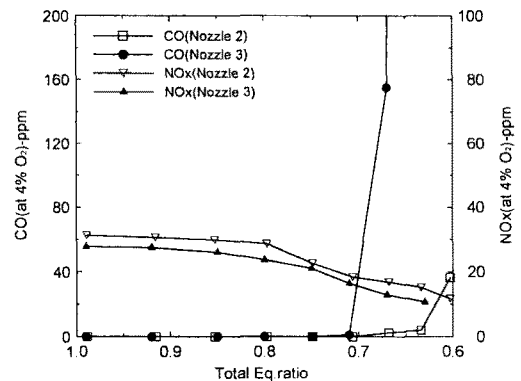
Fig. 8은 노즐변화에 따른 PTI 연소방식의 안정성 및 배기특성을 알아보기 위하여 총괄 당량비가 0.8인 조건에서 축방향의 연료와 산화제를 동시에 증가시키며 실험을 수행하였다. Fig. 8(a)는 PTI 연소방식의 안정성을 증가시키기 위하여 축방향의 연료 노즐을 Fig. 2와 같이 3가지 노즐에 대하여 실험한 결과이다. 그림에서 Stable Region I은 모든 형상의 노즐에 대하여 안정한 영역이며, Stable Region II는 Nozzle 2와 3만이 안정한 영역이다. Nozzle 1을 이용하여 총괄 당량비 0.8에서 운전할 경우 최대부하가 약 7,000kcal/hr 이상의 영역에서 화염이 불안정해지는 것을 알 수 있지만, Nozzle 2, 3의 경우는 유량계의 용량한계로 인해 최대부하를 확인하지는 못하였지만 15,000kcal/hr 이상에서도 안정한 연소영역이 존재하는 것을 확인하였다. 이것은

Nozzle 2와 3의 경우, Nozzle 1에 비해 축방향으로 분사되는 연료의 혼합도의 증가로 인하여 축방향 확산화염과 보염의 상호작용이 증가하기 때문이라 사료된다.

Fig. 8(b)는 3가지 노즐변화에 따른 PTI 연소방식의 배기특성을 나타낸 것이다. Nozzle 1의 경우에 안정화 영역에서는 다른 노즐과 NOx 및 CO의 배출에 대해 유사한 경향을 보이고 있으나, Fig. 8(a)의 결과에서와 같이 부하량 7,000 kcal/hr에서 불완전 연소에 의해 CO는 급격하게 증가함을 알 수 있다. Nozzle 2, 3의 경우에는 부하량이 증가할수록 CO의 미소 발생경향에는 변화가 없으나, NOx의 경우에는 오히려 감소되는 것을 볼 수 있다. 그리고 Nozzle 3의 경우에 Nozzle 2에 비해서 안정성은 거의 유사한 특성을 가지고 있지만, NOx 저감에 대해서는 더 큰 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Nozzle 2는 Nozzle 3에 비해 제작 측면에서 실용화에 많은 어려움이 있으며, 작은 노즐내



(a) Emission characteristics for three kind of nozzles at 5,000 kcal/hr.



(b) Emission characteristics for three kind of nozzles at 10,000 kcal/hr.

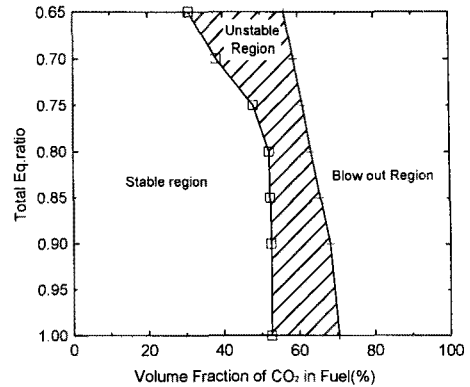
Fig.9 Emission characteristics for three kind of nozzles.

경으로 인한 압력손실과 소음발생의 문제점을 가지고 있음을 확인하였다. 그러므로 노즐 형상변화에 대한 연소기 내의 혼합특성 및 선회특성과 같은 세부적인 연구와 더불어, Nozzle 3에 관한 다양한 조건에서의 검토가 이루어져야 할 것이다.

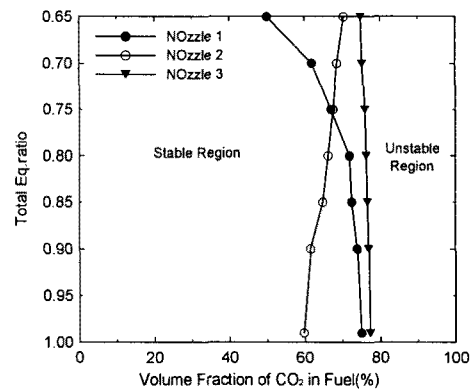
Fig. 9은 PTI 연소방식에서 부하량을 5,000, 10,000kcal/hr로 각각 고정한 후 총괄 당량비 변화에 따른 배기특성을 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 5,000kcal/hr의 경우로서, 모든 노즐에 대해 안정연소 영역 내에서 CO는 거의 발생되지 않으며, 당량비가 감소될수록 NOx는 점차적으로 감소됨을 알 수 있다. 각 노즐의 배기특성은 Fig. 8에서 언급했던 것과 동일한 거동을 보이고 있다. Fig. 9(b)는 10,000kcal/hr의 경우로서, 5,000kcal/hr에 비해 훨씬 낮은 당량비에서도 CO와 NOx의 배출량이 감소하고 있다. 또한 Nozzle 3의 안정화 특성은 Fig. 8의 가시적인 측정에서는 Nozzle 2와 거의 동일하였으나, 실제 배기의 CO 측정을 통해 Nozzle 2보다 넓은 화염 안정범위를 가짐을 짐작할 수 있다.

3.3 연료 중 CO₂ 첨가에 따른 연소특성

Fig. 10은 Cyclone Jet Combustor의 높은 화염 안정성을 실제 적용하기 위한 사례로서, CO₂를 다량 포함한 LFG (Landfill Gas)와 같은 저급연료의 사용을 위해, 기존의 LNG에 CO₂를 첨가한 혼합연료를 대상으로 화염안정성을 검토한 결과이다. 실험조건은 Fig. 7의 실험과 같이 총 부하량은 5,000 kcal/hr로 고정하였다. Fig. 10(a)는 일반적인 선회연소를 의미하는 ATI 연소방식에서 연료중 CO₂ 첨가율과 총괄 당량비에 대한 화염 안정화 영역을 도시한 것이며, 축방향의 연료 노즐은 Nozzle 1을 사용하여 실험을 수행하였다. ATI 방식의 경우 본 유동조건에 대해서 총괄 당량비 1.0에서 0.8까지는 연료중 CO₂ 첨가율이 50% 이상이 되면 화염이 불안정해지는 결과를 나타내지만 총괄 당량비가 0.8에서 0.65로 감소하면, 즉 축방향의 산화제 공급량이 증가하면 연료중의 CO₂ 첨가율이 30%로 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 10(b)는 3가지 노즐변화에 따른 PTI 연소방식의 경우로서 Nozzle 1인 경우 총괄 당량비 1.0에서 0.8까지는 연료중의 CO₂ 첨가율이 80% 이상이 되면 화염이 불안정해지는 결과를 나타내지만 총괄 당량비가 0.8에서 0.65로 감소하면 연료중의 CO₂ 첨가율이 50%로 줄어드는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 총괄 당량비가 증가하면 연료중의 CO₂ 첨가율이 감소하는 경향은 Nozzle 1인 경우 ATI와 PTI 연소방식에서 같은 경향을 보이지만 PTI 방식이 ATI 방식에 비해 모든 실험조건에서 연료중의 CO₂ 첨



(a) Stable regions of ATI mode for nozzle1.



(b) Stable regions of PTI mode for three kind of nozzles.

Fig.10 Stable regions for CO₂ blended fuel.

가율이 약 1.5배 향상되는 결과를 보이고 있다. 동일 유동조건에서 Nozzle 3의 경우 총괄 당량비에 관계없이 80%까지 화염이 안정한 것을 확인할 수 있다. 또한 Nozzle 2의 경우에는 Nozzle 1과는 상반되는 경향을 보이지만 전체적으로 ATI 연소방식보다 PTI 방식의 CO₂ 첨가에 의한 화염 안정성이 뛰어나다는 결과를 확인할 수 있다. 이 결과를 바탕으로 본 연소기는 기존에 화염안정성의 문제로 인하여 실용화되지 못했던 많은 저급연료의 활용에 기여하리라 기대된다.

4. 결론

본 연구는 화염 안정성 개선과 오염물질 저감을 위한 하이브리드 사이클론 제트 연소기의 개발로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PTI 연소방식이 ATI 방식보다 NO_x 배출이 현저히 감소하며, 특히 총괄 당량비 0.75 부근에서는 NO_x의 배출량이 거의 50%정도로 감소된다. 이는 PTI 방식의 경우 ATI 방식

보다 신체연소장의 에혼합화를 증가시키기 때문이라 사료된다.

- (2) PTI 연소방식에서 총괄 당량비 0.8로 운전할 경우, Nozzle 1에 비해 Nozzle 2와 3는 약 두배 이상의 화염 안정화 영역을 가지며, CO와 NOx의 저감에 더 큰 효과가 있음을 확인하였다. 이는 노즐 형상의 변화를 통한 연료의 혼합 증진과 보임과의 상호작용에 의한 영향으로 사료된다. 또한 Nozzle 3가 Nozzle 2에 비해 안정성 및 배기특성이 좋으며, 실용적인 측면에서 보다 상세한 연구가 진행되어야 할 것이다.
- (3) ATI 연소방식의 경우 연료 중 CO₂ 함유량이 50% 이상에서는 화염이 불안정해지는 결과를 보이지만 Nozzle 3를 적용한 PTI 방식의 경우는 CO₂ 함유량이 80% 까지 화염이 안정한 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] Douglas Feikema, Ruey-Hung Chen, and James F. Driscoll, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combust. and Flame*, pp. 183-195, 1990.
- [2] 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*, pp. 617-624, 1971.
- [3] Michael C. Drake and Richard J. Blint, "Thermal NOx in Stretched Laminar Opposed-Flow Diffusion Flames with CO/H₂/N₂ Fuel," *Combust. and Flame*, pp. 151-167, 1989.
- [4] Jong-Hyun Kim, Chang-Bo Oh, Chang-Eon Lee, "Numerical and Experimental Studies on the NOx Emission Characteristics of CH₄-Air Coflow Jet Flames," *Transactions of the Society of Mechanical Engineers*, in press.
- [5] Ruey-Hung Chen and James F. Driscoll, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters." *23th Symposium(int.) on Combustion, The Combustion Institute*, pp. 281-288, 1990.
- [6] Richard A. Yetter, Irvin Glassman and H. Cray Gabler, "Asymmetric Whirl Combustion : A New Low NOx Approach," *Proc. Combust. Inst.* 28, pp. 1265-1272, 2000.
- [7] 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*, pp. 485-486, 2001.
- [8] Kazuhiro Yamamoto, Yasuki Nishizawa, Hirokazu Takeda and Yoshiaki Onuma, "Reaction Zone Thickness of Turbulent Premixed Flame," *Proceedings of the 39th Japanese Symposium on combustion*, pp. 7-8, 2001.