

## 저공해와 고안정성을 위한 신개념의 사이클론 제트 하이브리드 연소기의 연소특성

정원석\* · 황철홍\* · 이규영\*\* · 이창언†

(2003년 9월 15일 접수, 2003년 12월 27일 심사완료)

### The Combustion Characteristics of a New Cyclone Jet Hybrid Combustor for Low Pollutant Emission and High Flame Stability

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

**Key Words:** Hybrid Combustor(하이브리드 연소기), Swirl Combustor(선회 연소기), Flame Stability(화염 안정성), Low Pollutant Emissions(저공해 배출), NOx(질소 산화물)

#### Abstract

A Promising new approach to achieve low pollutant emissions and improvement of flame stability is tested experimentally using a cyclone jet hybrid combustor employing both premixed and diffusion combustion mode. Three kinds of nozzle are tested for mixing enhancement of fuel and air. The LNG (Liquified Natural Gas) is used as a fuel. The combustor is operated by two methods. One is DC (Diffusion Combustion) mode generated swirl flow by air as general swirl combustor, and the other is HC (Hybrid Combustion) mode. The HC mode consists of diffusion jet flame of axial direction and premixed cyclone flame of tangential direction in order to stabilized the diffusion jet flame. The results showed that the flame stability of HC mode is significantly enhanced than that of DC mode through the change of mixing characteristics by modifications of fuel nozzle. In addition, the reductions of CO and NOx emission in HC mode, as compared with that for the DC mode, is large than about 50% in stable region. Also, even using the low calorific fuel as CO<sub>2</sub>-blended gas, it is identified that the cyclone jet hybrid combustor has the high performance of flame stability.

#### 1. 서 론

최근 환경 오염물질에 대한 규제강화로 인하여 저공해 연소기 개발에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 오염물질들 중에 가장 문제시되는 것은 NOx이며, 이 NOx를 획기적으로 저감할 수 있는 연소방법으로는 최근에 촉매 연소법이 제안되고 있으나, 현재로서는 시스템의 복잡성, 촉매 재질의 열적 내구성 등으로 인하여 아직은 산업용 보

일러, 노용의 연소기에 적용하기에는 부적합하다.

현재 사용되는 산업용 저NOx 연소기의 대부분은 기본적으로 선회 확산화염의 형태에 재연소법(Reburn Combustion), 다단 연소법(Multi-Staged Combustion), 배가스 재순환법(Exhaust Gas Recirculation)등의 기능이 추가된 형태라 할 수 있다. 선회 확산화염은 연료 제트 주위로 선회하는 공기를 공급시켜 재순환 영역을 형성하여 화염을 안정시키는 연소형태로, 난류강도를 증가시킬 수 있어 혼합이 촉진되며, 연소 생성물의 자체 재순환 및 화염 신장 등을 통해 NOx를 저감하는 역할을 수행한다고 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup> 그리고 위에 언급한 저NOx 연소기들은 이 선회화염에 재연소, 다단 연소, EGR 등에 의해 화염온도를 낮추어 NOx를 저감하는 방법이라 할 수 있다. 이들 기존의 방법도 산업용 연소기의 NOx 발생 저감에 상당히 기여하고 있으나, 점점 엄격해지는 환경

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 인하전문대학 자동차공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : chelee@inha.ac.kr

TEL : (02)860-7323 FAX : (032)868-1716

규제를 충족시키기 위해서는 더 많은 개선과 최적화가 요구되고 있다.

또한 연소기에서 발생하는 NOx를 체계적으로 저감시키기 위해서는 연소방식에 따른 NOx 생성 특성, NOx 생성에 미치는 여러 인자들에 대하여 철저히 분석할 필요가 있다. 이와 같은 기초연구로서 Kim 등<sup>(3)</sup>은 CH<sub>4</sub>-Air 동축화염을 대상으로 당량비 변화에 따른 NOx 생성특성에 대한 실험 및 수치해석적 연구에서 확산화염에 비해 예혼합화염에서 NOx 배출량(EINOx)이 매우 적음을 보고하였다. 그리고 Drake 등<sup>(4)</sup>과 Chen 등<sup>(5)</sup>은 화염면의 신장으로 인하여 화염온도와 체류시간이 감소되어 NOx 발생이 저감됨을 확인하였다. 또한 Han 등<sup>(6)</sup>은 난류 확산화염에서도 주위공기의 난류강도만을 변화시켜도 NOx 발생량이 상당히 감소함을 지적한바 있다. 이들 연구들을 종합해보면, NOx 발생을 최소화하는 데에는 예혼합적으로 연소되는 연료가 많을수록 유리하며, 또 난류강도는 클수록 유리함을 알 수 있다. 이러한 개념을 적용한 최근의 연구 사례로서 Yetter 등<sup>(7)</sup>은 접선방향의 공기 노즐 입구에 연료 노즐을 배치하여, 공기의 강한 선회로 인한 화염의 신장과 예혼합적으로 연소를 국부적으로 형성하여 NOx 저감을 시도한 바 있다. 또한 Onuma 연구그룹<sup>(8,9)</sup>은 예혼합 연료를 접선방향으로 분사하면서 안정된 화염을 형성한 후에, 연소기 중심부에 다수의 노즐을 이용하여 고속의 연료/공기 확산화염을 생성시켜 화염안정성을 개선시킴과 동시에 NOx를 저감시키는 연소방식을 제안한 바 있다.

본 논문은 앞에서 언급한 NOx 발생 최소화 개념을 구현할 수 있는 산업용 연소기의 개발을 위한 선행 연구결과이다. 연소기의 기본적 형태는 Onuma 그룹이 제안한 방식과 유사하나, 실용 연소기에 적합하도록 일부를 변경한 사이클론 제트 하이브리드 연소기(Cyclone Jet Hybrid Combustor)를 대상으로, 우선 가능성 타진에 목적을 두고 수행한 것이다.

2. 실험장치

Fig. 1은 Onuma 그룹이 제안한 연소방식의 개요를 도시한 것이며, Fig. 2는 본 연구에서 실용화 연구를 위해 사용한 연소기의 개략도를 나타낸다. 이 연소기에서는 원통 하단에 접선방향으

로 설치된 측면 노즐에서 예혼합기를 분사하면 각 노즐에 형성된 화염 끝 부분이 다음 노즐의 화염을 안정화시키는 역할을 하여 연소기 하단에 도넛형(torroidal)의 예혼합화염이 형성된다. 이 화염이 Fig. 1에서와 같이 연소기 중앙의 부상된 확산화염의 점화원 역할을 하기 때문에 화염 안정성을 더욱 개선시켜 준다. 또한 축방향으로 분사되는 연료를 다수의 노즐을 통해 분배하여 공급함으로 국부적으로는 확산화염이나, 연소실 내의 혼합영역에서 예혼합기가 형성되어, 상당량의 연료가 예혼합적으로 연소하게 된다.

Fig. 2의 실험용 연소기 내부는 ISOC-AST (RC18)의 분말형 내화재로 성형 제작하였고, 내경 및 높이는 각각 40mm, 35mm이며, 연소기 출구의 내경은 25mm로 하였다. 그리고, 선회 노즐

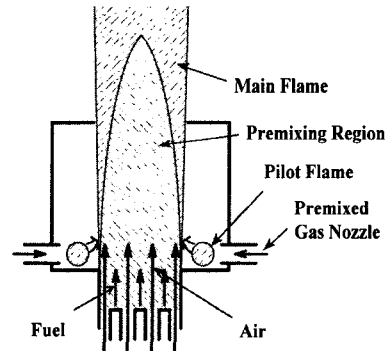


Fig. 1 Schematic of hybrid combustion

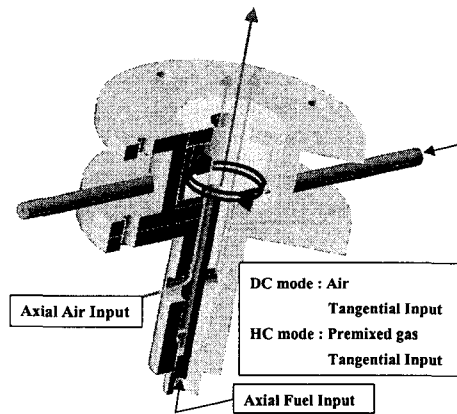


Fig. 2 Schematics of diffusion combustor (DC) and cyclone jet hybrid combustor (HC)

Table 1 Detail design conditions of jet nozzles

	Fuel nozzle		Air nozzle	
	Din (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Din (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )
Nozzle 1	4.00	12.57	20.0	294.52
Nozzle 2	1.79	12.57	20.0	113.10
Nozzle 3	1.63	12.57	20.0	263.90

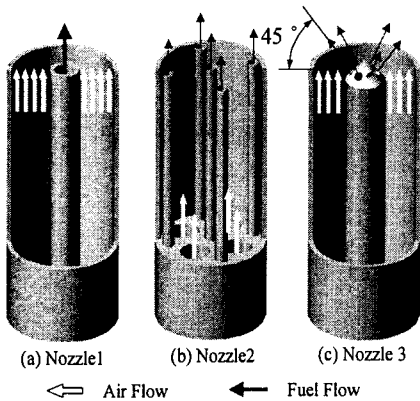


Fig. 3 Configurations of jet fuel/air nozzles

은 내경 4mm이며, 중앙의 연료 노즐로부터 10 mm 높이에 위치한다. 중앙의 연료/공기 노즐은 Onuma 그룹이 사용한 Fig. 3(b)의 다수 노즐 (multi-nozzle) 외에, 이를 단순화한 Fig. 3(a)의 단일 노즐(single nozzle), 실용 노즐에 적합한 다공 노즐(multi-hole nozzle) 3종류에 대하여 실험을 수행하였다. 여기서 각 연료 노즐의 총 출구 면적은 내경 4mm 단일 노즐과 동일하게 제작하였다. 이들 3종류의 연료/공기 노즐에 대한 상세한 내용은 Table 1과 같다.

유료계는 Fig. 4와 같이 연료 및 공기 제어 공급 시스템으로 구성되어 있으며, 유량제어는 버블유량계로 보정된 질량유량계(MFC Tylan FS 280 series, MFC Hi-Tec)를 이용하였다. 배기가스는 직경 150mm, 길이 1,000mm로 제작된 밀폐된 연소실의 충분한 후류에서 포집하였고, 포집된 가스는 Water trap을 통하여 수분을 제거한 후, Electro chemical 형의 가스 분석기(Testo 350XL)를 사용하여 NO, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>에 대하여 측정하였다. 도시한 CO 및 NOx 농도는 O<sub>2</sub> 4.0%인 배기가스를 기준으로 환산한 값이며, NOx는 NO와

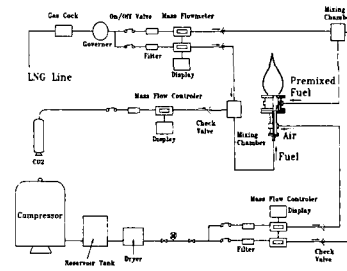


Fig. 4 Schematic of the experimental apparatus

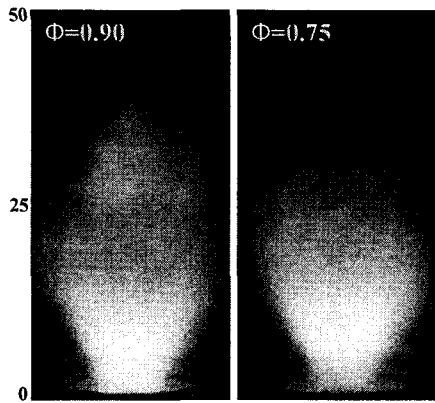
NO<sub>2</sub>를 합한 값이다.

### 3. 결과 및 고찰

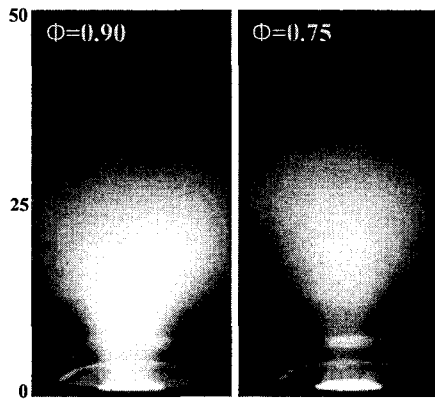
#### 3.1 연소방식에 따른 특성 비교

본 실험용 연소기에서는 Fig. 2에서와 같이 중앙의 연료/공기 노즐을 이용하여 확산연소를 시키면서, 측면 노즐에서는 공기만을 선회 분사하는 확산 연소(Diffusion Combustion, 이하 DC) 방식과, 측면 노즐에서 예혼합기를 공급하여 도넛형의 예혼합 화염을 동시에 형성하는 하이브리드 연소(Hybrid Combustion, 이하 HC) 방식을 동시에 수행하여 두 연소 방식의 장단점을 비교하였다.

Fig. 5는 부하량 5000kcal/hr에서 DC와 HC 방식에 대해 총괄 당량비 0.9와 0.75에 대한 직접사진의 결과를 나타낸 것이다. 초기 선회효과를 동일 시하기 위하여 선회강도 즉 축방향에 대한 반경 방향의 운동량 비율이 동일한 조건에서 가시화하였다. 화염형상은 HC 방식이 DC 방식 보다 소형화되며, 당량비에 따른 화염길이의 변화도 작음을 알 수 있다. 이는 DC 방식은 모든 연료가 확산연소방식으로 연소되나, HC 방식은 상당량의 연료가 예혼합적으로 연소되기 때문이다. 또한 화염색을 통해 DC 방식의 연소는 화염 하류에 황염이 형성되나, HC의 경우에는 화염이 전체적으로 청염을 보이는 것으로 보아 Soot의 발생량이 거의 없음을 짐작 할 수 있다. 본 논문에 제시하지 않았지만, HC의 경우는 부하량 증가에 따른 화염형상의 변화가 매우 작았으나, DC 방식은 화염길이가 크게 증가하면서 황염을 나타내는 화염면적 역시 점차 증가하였다. 이 결과로부터 HC 방식은 기존의 선회 확산화염에 비해 화염형상이



(a) DC mode (mm)

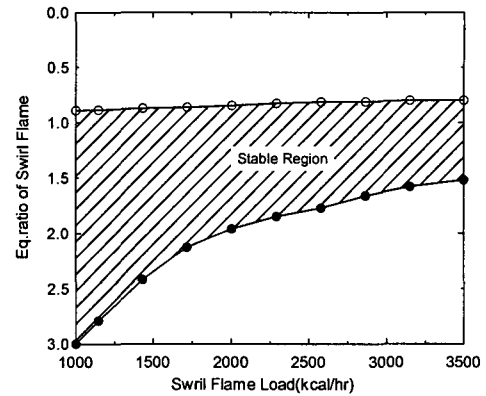


(b) HC mode (mm)

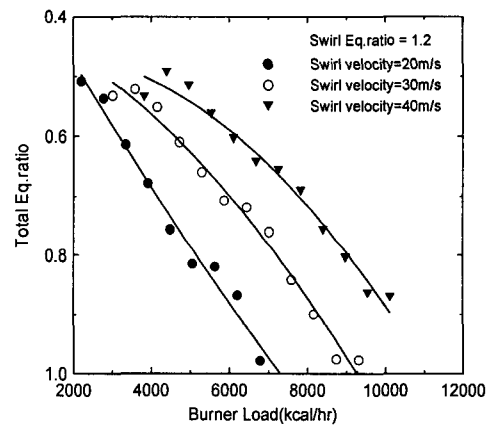
Fig. 5 Direct photographs of flame shape (burner load=5000kcal/hr, swirl velocity = 30m/s)

소형화되며, Soot 발생도 저감됨을 간접적으로 확인할 수 있었다.

HC 방식에서 도넛형의 선회 예혼합화염은 중앙의 부상된 확산화염의 점화원 역할을 수행해야 하기 때문에 항상 안정된 화염이 형성되어야 한다. Fig. 6은 이 선회화염의 최적 유속 및 당량비를 결정하기 위하여, 중앙의 화염이 없는 조건에서 선회화염의 부하량 및 당량비에 따른 안정화 영역을 도기한 것이다. Fig. 6(a)를 보면 선회화염은 부하량 증가에 관계없이 당량비 0.9~1.6 사이의 영역에서 항상 안정된 화염을 형성함을 알 수 있다. 또한 축방향 유동이 존재하는 경우에도 선회화염의 당량비가 1.1 이상이 되면 화염은 항상 안정한 상태를 유지함을 확인하였다. 본 연소기



(a) Stable region of swirl flame without axial flows



(b) Stable regions of axial diffusion flame with swirl velocity in HC mode

Fig. 6 Determinations of optimum swirl velocity and equivalence ratio

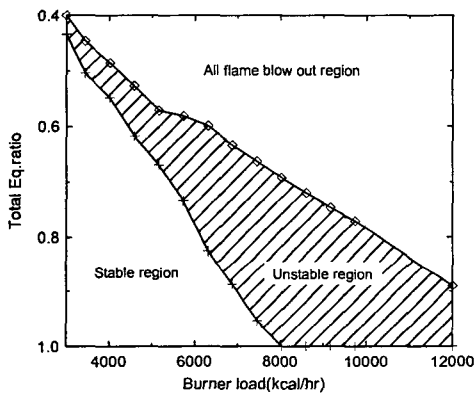
에는 두 개의 측면노즐이 설치되어 있으나 노즐 수, 위치 및 분사각도의 조절을 통해 예혼합화염의 안정성을 더욱 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6(b)는 이 선회화염의 최적 당량비 영역인 당량비 1.2에서 선회유속의 변화에 대한 축방향 확산화염의 안정성을 검토한 것이다. 선회속도가 20m/s에서 40m/s로 증가됨에 따라 안정화영역은 크게 증가하는데, 이는 선회 예혼합 화염이 확산 화염의 점화원 역할 외에도 유속의 증가로 인한 난류강도의 증가로 화염을 더욱 안정시킬 수 있음을 의미한다. 이 결과를 통해 본 연소기는 실용측면에서 고정된 부하량에 대하여 선회 예혼합

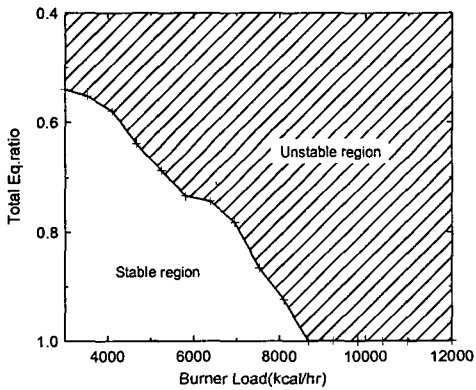
연소와 축방향의 확산 연소량의 적절한 분배를 통해 화염안정화를 극대화시킬 수 있을 것으로 기대어진다. 또한 Fig. 6(b)와 유사한 조건에서 선회화염의 당량비 변화에 대한 축방향 확산화염의 안정성을 검토한 결과, 보염의 당량비가 축방향 확산화염의 안정성에 미치는 영향은 매우 작음을 확인하였다. 이는 난류화염의 안정성은 당량비 변화에 의한 영향보다는 선회도의 증가로 인한 난류강도의 변화에 더욱 큰 영향을 받기 때문으로 사료된다. 위의 결과들을 바탕으로 본 연구에서는 안정화된 보염의 조건을 당량비 1.2와 유속 30m/s로 고정한 상태에서 모든 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 DC와 HC 방식의 화염안정성 차이를 알아보기 위하여 Nozzle 1을 대상으로 총 부하량

에 대한 안정화영역을 당량비에 대해 도시한 것이다. 초기 선회효과를 동일 시 하기 위하여 DC방식에서 접선방향으로 분사되는 공기량은 HC 방식의 예혼합기 질량유량과 동일하게 공급하였다. 그림에서 Unstable region은 화염이 간헐적으로 부상되거나 재부착을 반복하는 상태를 의미한다. DC와 HC 방식에 의한 화염 안정영역을 비교해 보면 전체적으로 큰 차이를 보이지 않지만, HC 방식이 부하량 5,500kcal/hr 보다 낮은 영역에서는 안정화 영역이 DC 방식에 비해 미소하게 적으나, 부하량이 큰 영역에서는 보다 안정된 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 부하량이 작은 경우에, HC 방식에서 분사되는 예혼합 선회화염과 Nozzle 1과 같은 단일 노즐에서 생성되는 축방향 확산화염의 상호작용이 비교적 작기 때문으로 사료된다. 그리고 DC와 HC 방식 모두 접선방향으로 동일한 질량유량이 공급되어 초기 유사한 선회도를 갖게 되지만, HC 방식의 경우에는 화염에 의한 점성의 증가로 난류강도의 감소가 초래되어 결과적으로 선회효과를 저감시킬 수 있다. 두 연소방식이 안정성에 미치는 또 다른 차이점은 DC 방식의 경우는 부하가 증가될수록 불안정한 영역에서 결국 화염이 소멸되는 Blowout 영역이 증가하나, HC 방식의 경우는 항상 안정된 보염에 의해 모든 운전조건에서 Blowout 현상은 발생되지 않는 장점을 가지고 있다.



(a) Stable regions of DC mode



(b) Stable regions of HC mode

Fig. 7 Stable regions of DC and HC mode with burner load for nozzle 1

Fig. 8은 DC와 HC 방식에서 총괄 당량비에 대한 NOx와 CO의 배기특성을 나타낸 것으로, 이때 총 부하량은 5,000kcal/hr로 고정하였다. CO 발생

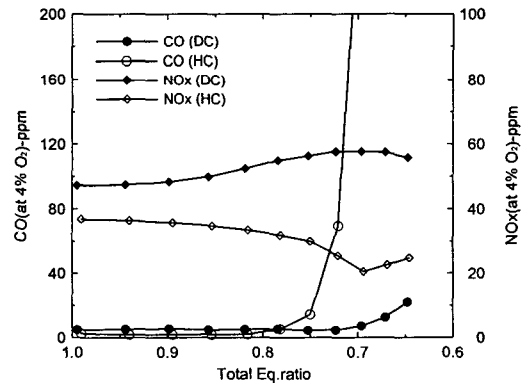


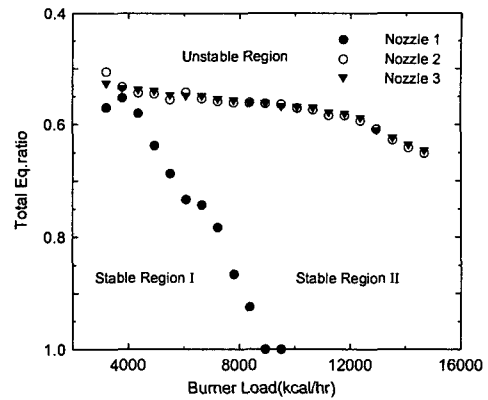
Fig. 8 CO and NOx Emissions of DC and HC mode with total eq. ratio at 5,000kcal/hr for nozzle 1

이 약 5.0ppm 미만인 안정영역에서 총괄 당량비가 감소할수록 HC 방식이 DC 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, HC 방식이 DC 방식보다 CO의 발생량이 역시 작음을 볼 수 있다. 즉 HC 방식에서는 연료의 일부분을 예혼합 방식으로 연소시키기 때문에 DC 방식에 비해 CO와 NOx의 발생량이 크게 감소함을 예측할 수 있다. 다만 총괄 당량비가 0.75 보다 작은 조건에서는 Fig. 7에서 언급된 바와 같이, HC 방식의 낮은 부하량에서의 불안정성으로 인하여 CO가 매우 높아지는 현상을 보이고 있다. 그러므로 HC 방식의 최적화를 위해서는 화염이 안정된 영역에서의 CO와 NOx의 저감특성은 유지하면서, 화염 안정영역을 증가시켜야 한다. 이를 위해 연료 및 공기의 혼합 촉진과 선회 예혼합화염과 제트 확산화염과의 상호작용을 증대시키기 위한 연료 노즐의 개선이 요구되어 진다.

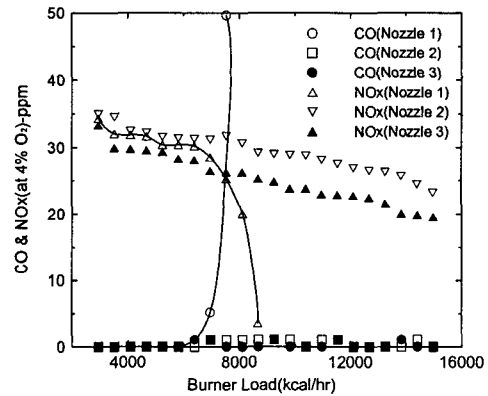
3.2 HC 방식에서 노즐 형상변화에 따른 연소특성

HC 방식에서 Nozzle 1이 적용된 경우에는, DC 방식에 비해 NOx와 CO의 저감효과는 크지만, 안정성 측면에서 큰 차이가 없으며, 오히려 부하량이 작은 경우에 안정영역이 작아짐을 확인하였다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여, Table 1과 같이 연료 노즐의 총 유효면적은 Nozzle 1과 같으면서 다수의 노즐과 다공 노즐의 개념을 적용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 HC 방식에서 노즐변화에 따른 화염 안정성 및 배기특성을 검토한 것이다. Fig. 9(a)에서 Stable Region I은 모든 형상의 노즐에 대하여 안정한 영역이며, Stable Region II는 Nozzle 2와 3만이 안정한 영역이다. 실용연소기에 주로 적용되는 총괄 당량비 0.8에서, Nozzle 1의 경우에는 약 7,000kcal/hr 이상의 영역에서 화염이 불안정해지는 것을 볼 수 있다. 그러나 Nozzle 2와 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 축방향



(a) Stable regions



(b) CO and NOx Emissions when total eq. ratio is fixed by 0.8

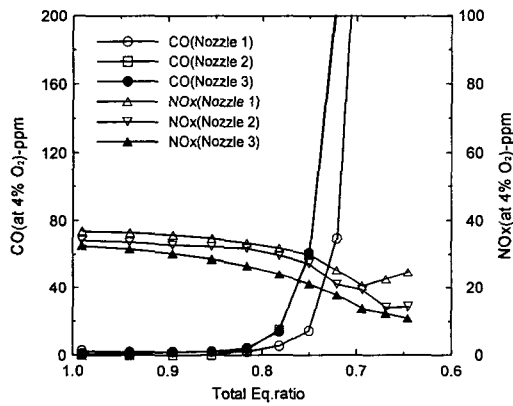
Fig. 9 Stable regions and emissions with burner load for three kinds of nozzle

으로 분사되는 연료의 혼합도 증가로 인하여 축방향 확산화염과 보염의 상호작용이 증가하기 때문이라 사료된다. 또한 Nozzle 2와 3은 전 영역에 대해 거의 같은 안정화 영역을 가지나, 미소하게 Nozzle 3이 Nozzle 2에 비해 보다 안정됨을 볼 수 있다.

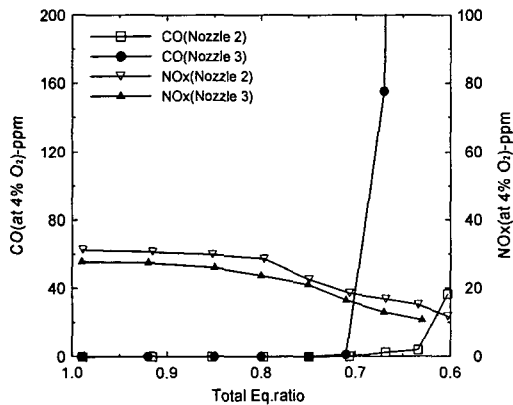
Fig. 9(b)는 3가지 노즐에 대해 총괄 당량비를 0.8로 고정한 상태에서 부하량에 따른 CO와 NOx의 배출량을 도시한 것이다. 화염 안정영역에서는 Nozzle 1이 다른 노즐과 비교할 때, NOx 및 CO의 배출에 대해 유사한 경향을 보이고 있으나, 부하량 7,000kcal/hr 근처에서 불완전 연소에 의해 CO가 급격하게 증가함을 알 수 있다. Nozzle 2와 3의 경우에는 부하량이 증가할수록 CO의 미소 발생경향에는 큰 변화가 없으나, NOx의 경우에는 점차적으로 감소되는 것을 볼 수 있다. 또한 Nozzle 3의

경우가 Nozzle 2에 비해서 NOx 발생 저감에 대해서는 보다 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 HC 방식에서 부하량을 5,000kcal/hr와 10,000kcal/hr로 각각 고정한 후 총괄 당량비 변화에 따른 배기특성을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 5,000kcal/hr의 경우로서, 모든 노즐에 대해 안정 연소영역(0.8~1.0) 내에서 CO는 거의 발생되지 않으며, 당량비가 감소될수록 NOx는 점차적으로 감소됨을 알 수 있다. 각 노즐의 배기특성은 Nozzle 3의 경우에 NOx의 발생량이 가장 적으며, CO의 발생량은 Nozzle 2와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 10(b)는 10,000kcal/hr의 경우로서, 5,000kcal/hr에 비해 훨씬 넓은 범위에서 낮은 CO와 NOx의 배출량을 나타내고 있다. 화염 안정영역



(a) CO and NOx emissions at 5,000kcal/hr



(b) CO and NOx emissions at 10,000kcal/hr

Fig. 10 CO and NOx emissions with total eq. ratio at 5,000 and 10,000kcal/hr for three kinds of nozzle

역(0.7~1.0)에서는 Nozzle 3이 Nozzle 2에 비해 NOx 발생량이 적고, 미소한 CO 발생량을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Nozzle 2는 Nozzle 3에 비해 제작 측면에서 실용화에 많은 어려움이 있으며, 길이가 크고 내경이 작은 노즐로 인한 압력손실과 소음발생의 문제점을 가지고 있음을 확인하였다. 그러므로 노즐 형상변화에 대한 연소기 내의 혼합특성 및 선화특성과 같은 세부적인 연구와 더불어, Nozzle 3에 관한 다양한 조건에서의 검토가 이루어져야 할 것이다.

### 3.3 CO<sub>2</sub>를 포함한 저급 연료에 대한 연소특성 검토

Fig. 11은 높은 화염안정성을 가진 본 연소기의 활용 가능성을 검토하기 위하여, CO<sub>2</sub>를 40~50% 정도 포함한 저급연료인 LFG(Landfill Gas)를 대상으로 화염 안정영역을 도식한 것이다. 실험에서 총 부하량은 5,000kcal/hr로 고정하였고, 연료에 첨가되는 CO<sub>2</sub>의 부피비에 따른 화염의 Blow-out이 발생하는 총괄 당량비를 측정하였다. 그림에서 DC 방식의 Nozzle 1의 경우에 총괄 당량비 1.0에서 0.8까지는 연료 중 CO<sub>2</sub> 첨가율이 50% 이상이 되면 화염이 불안정해지는 결과를 나타낸다. 또한 축방향의 산화제 공급이 증가하여 총괄 당량비가 0.8에서 0.65로 감소하면, 30% 이상의 CO<sub>2</sub> 첨가는 화염을 불안정하게 함을 알 수 있다. DC 방식에서는 Fig. 7(a)에서와 같이 화염은 불안정해지다가 결국 Blowout 되나, Fig. 11에는 표현하지 않았다. 반면에 HC 방식의 Nozzle 1의 경우

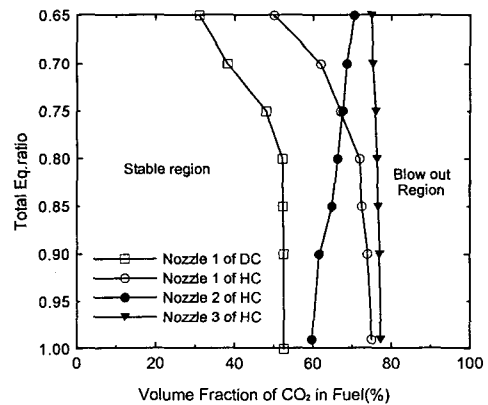


Fig. 11 Stable regions with volume fraction of CO<sub>2</sub> in fuel at 5,000 kcal/hr

에는 DC 방식에 비해 CO<sub>2</sub> 첨가 비율이 약 20% 이상 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한 HC 방식의 Nozzle 2의 경우에는 Nozzle 1의 경우 보다 총괄 당량비 0.75 이상에서 다소 낮은 안정범위를 보이나, Nozzle 3의 경우에는 연료 중에 약 80%의 CO<sub>2</sub>를 포함시켜도 모든 당량비의 영역에서 화염이 안정되어 있음을 확인 할 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 본 연소기에 개선된 연료노즐의 적용은 화염안정성 때문에 실용화에 어려움이 있었던 저급연료의 활용에 기여할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

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

(1) HC 방식은 DC 방식과 비교할 때, 안정된 예혼합 선회화염에 의해 화염의 Blowout이 발생되지 않으며, 화염의 크기가 작고 Soot 발생량이 거의 없음을 확인하였다. 또한 DC 방식보다 CO 및 NO<sub>x</sub> 배출이 현저히 감소(최대 50%)하였다. 그러나 단일 연료 노즐의 사용 시에 화염 안정영역이 적어 연료 노즐의 개선이 요구되어진다.

(2) HC 방식에서 총괄 당량비 0.8로 운전할 경우, 단일 노즐에 비해 다수(Nozzle 2) 및 다공 노즐(Nozzle 3)은 약 두배 이상의 화염안정화 영역을 가지며, CO와 NO<sub>x</sub>의 저감에 큰 효과가 있음을 확인하였다. 이는 노즐 형상의 변화를 통한 연료와 공기의 혼합증진과 보염과 제트 확산화염의 상호작용의 증가에 의한 영향으로 사료된다. 또한 다공 노즐이 다수 노즐에 비해 안정화 영역에서 NO<sub>x</sub> 저감능력이 우수하며, 실용적인 측면에서 보다 상세한 연구가 진행되어야 할 것이다.

(3) DC 방식의 경우에 연료 중 CO<sub>2</sub> 함유량이 30~50% 이상에서는 화염이 불안정하지만, HC 방식에서는 DC 방식에 비해 함유량이 20% 이상 증가됨을 확인할 수 있다. 또한 다공 노즐의 경우에 CO<sub>2</sub> 함유량이 약 80%일 때 총괄 당량비에 무관하게 항상 화염이 안정되어 저급연료의 활용에 크게 기여할 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 지역기술개발용역사업의

일환으로 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Feikema, D., Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "Enhancement of Flame Blowout Limits by the Use of Swirl," *Combustion and Flame*, Vol. 80, pp. 183~195.
- (2) Syred, N., Chigier, N. A., and Beer, J. M., 1971, "Flame Stabilization in Recirculation Zones of Jets with Swirl," *Proceedings of the Combustion Inst.*, Vol. 13, pp. 617~624.
- (3) Kim, J. H., Oh, C. B. and Lee, C. E., 2002, "Numerical and Experimental Studies on the NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of CH<sub>4</sub>-Air Coflow Jet Flames," *Transactions of KSME B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1531~1541.
- (4) Drake, M. C. and Blint, R. J., 1989, "Thermal NO<sub>x</sub> in Stretched Laminar Opposed-Flow Diffusion Flames with CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Fuel," *Combustion and Flame*, Vol. 76, pp. 151~167.
- (5) Chen, R. H. and Driscoll, J. F., 1990, "Nitric Oxide Levels of Jet Diffusion Flames : Effects of Coaxial Air and Other Mixing Parameters," *Proceedings of the Combustion Inst.*, Vol. 23, pp. 281~288.
- (6) Han, J. W., Jeong, Y. S. and Lee, C. E., 2001, "The Effect of Turbulence Intensity on the NO<sub>x</sub> Formation of Hydrogen Coaxial Jet Turbulent Diffusion Flames," *Transactions of KSME B*, Vol. 25, No. 2, pp. 147~155.
- (7) Yetter, R. A., Glassman, I. and Gabler, H. C., 2000, "Asymmetric Whirl Combustion : A New Low NO<sub>x</sub> Approach," *Proceedings of the Combustion Inst.*, Vol. 28, pp. 1265~1271.
- (8) Hoshino, Y., Morikawa, M., Noda, S. and Onuma, Y., 2001, "Premixing Combustion of Fuel Spray by a Cyclone-Jet Combustor," *Proceedings of the 39th Japanese Symposium on combustion*, pp. 485~486.
- (9) Yamamoto, K., Nishizawa, Y., Takeda, H. and Onuma, Y., 2001, "Reaction Zone Thickness of Turbulent Premixed Flame," *Proceedings of the 39th Japanese Symposium on combustion*, pp. 7~8.