

## 예혼합 희박 연소기의 연소특성에 관한 연구

김한석\* · 임암호\* · 안국영\* · 이상민\*

### Study on the Combustion Characteristics of a Lean-Premixed Combustor

Han Seok Kim<sup>\*†</sup>, Am Ho Lim<sup>\*</sup>, Kuk Young Ann<sup>\*</sup>, Sang Min Lee<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

Various types of the air/fuel pre-mixer have been designed and tested to investigate the combustion characteristics of the lean-premixed gas turbine combustor, such as NO emission and flame stability. One type of the pre-mixers has been selected and installed to a 70 kW lean-premixed gas turbine combustor. The concentrations of CO and NO were measured with varying equivalence ratios in the combustion chamber at ambient pressure. The result shows that the emissions of CO and NO are heavily affected by the shape of the pre-mixer. The NO and CO emissions decreased, as the mixing ratio of air and fuel increased. In addition, the NO emission of the lean-premixed low NOx combustor is more dependent on the equivalence ratio than that of the conventional combustor.

**Key Words** : Lean premixed combustion(예혼합 희박 연소), Reverse flow type(역류 통형방식), Low NOx(저 NOx), Gas turbine combustor(가스 터빈 연소기), Pre-mixing chamber(예혼합실), Air preheater(공기 예열기)

#### 1. 서 론

가스터빈 연소기는 압축기로부터 나온 고온·고압의 공기를 연료와 반응시켜 높은 열에너지를 갖게 하고 이를 터빈으로 전달하여 기계적 에너지를 얻게 하는 역할을 수행하는 부분이다. 이러한 연소기의 설계는 고온·고압유동에 난류유동, 연료의 화학반응이 수반되는 등 연소기내 유동현상의 복잡성으로 인하여 수년간의 경험과 실험에 의하여 구축된 자료를 토대로 이루어지고 있다 [1-3].

최근 환경문제가 심각하게 대두됨에 따라 다양한 저공해 연소기의 개발이 진행 중이며, 그 방법으로는 다단연소(staged combustion), 가변형상(variable geometry), 희박 예혼합 증발 연소(lean premixed prevaporized combustion), 농후 급냉각 희박연소(rich quick quench lean burn

combustion), 촉매연소(catalytic combustion)와 같은 연구가 개발되고 있다[4]. 이러한 저 NOx 연소기술 중 현재 가스터빈에 적용되고 있는 연소 방법으로는 희박 예혼합연소(lean premixed burning), 과농 희박연소(rich lean burning)[5,6] 및 촉매연소 등이 있다. 희박 예혼합연소 방법은 초기에 연소용 공기를 가연 하한계(lower combustion limit)에 가깝게 연료와 다량의 공기를 예혼합하여 연소시켜 주연소 영역의 온도를 낮춤으로서 NOx를 저감시킨다. 과농 희박연소는 희박 예혼합연소 방법과는 반대로 주연소 영역에 연소용 공기를 가연 상한계(upper combustion limit)에 가깝게 공급하여 연료 과농상태로 연소시켜 화염온도를 저하시키고 그 후류 쪽에 공기를 다량으로 공급하여 희박연소 시켜 고온영역을 가능한 축소함으로써 NOx를 저감하는 연소 방법이다. 또한 촉매 연소방법은 flameless process로서 연료/공기 혼합기의 일반적인 가연한계(lean flame limit)이하의 온도에서 연료의 산화반응이 일어나도록 하여 기존의 연소기술 보다 낮은 온

\* 한국기계연구원 (KIMM)

† 연락처, E-mail : haskim@kimm.re.kr

도영역에서 연소함으로서 NO<sub>x</sub>를 저감시키는 연소 방법이다.

본 연구에서는 저 NO<sub>x</sub> 연소 기술로서 희박 예혼합 방식을 선정하였다. 희박 예혼합 연소기의 연소특성을 관찰하기 위하여 주연소 영역의 연소특성을 지배하는 예혼합기(premixer, 이하 예혼합기)를 여러 형상으로 제작하여 주연소 영역에서의 당량비 변화에 대한 배가스 분석실험을 수행하였으며, 그중 CO와 NO<sub>x</sub>의 배출특성이 가장 양호한 예혼합기를 선정, 실제 가스터빈 연소기에 적용하여 동일 용량의 기존 연소기와의 연소특성을 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 연소기 및 예혼합기

희박 예혼합 연소기의 설계기준은 LPG용 70kW급 연소기로 하였으며 이 경우 한국기계연구원에서 개발된 설계용 프로그램(KACOM)을 이용하여 Table 1과 같은 기본 설계를 도출하였다[7-9].

예혼합기는 Table 1의 설계점에서 연소기에 공급되는 연소용 공기 총량 중 예혼합에 공급되는 공기량은 당량비 0.55를 기준으로 하였다. 예혼합기 내 혼합가스의 유속은 압력손실을 고려하여 57m/sec로 하여 출구면적을 결정하였으며 연료/공기의 혼합특성 및 화염 안정성을 위하여 선회강도 0.99의 선회기를 예혼합기 관로에 설치하였다. 예혼합기의 형상은 Fig. 1의 (a), (b)와 같이 예혼합기의 출구가 Block형인 것과 (c), (d)와 같이 Cone형인 예혼합기를 이용하였으며, (a)와 (c)는 선회기 하류에 그리고 (b)와 (d)는 선회기 상류에 연료 공급구를 설치하여 예혼합기의 형상이 주연소 영역의 연소특성에 미치는 영향을 관찰할 수 있도록 하였다. 그리고 선회기와 연료/공기의 혼합거리는 연소실에 공급되는 혼합가스의 혼합특성에 영향을 미치기 때문에 이에 대한 영향을 알아보기 위하여 연료분출구를 선회기 전

Table 1 Basic design of 70 kW lean-pre mixed gas turbine combustor

구분	단위	값
air flowrate (W <sub>a</sub> )	kg/sec	0.701
air Pressure(P <sub>3</sub> )	kPa	349.3
air Temperature(T <sub>3</sub> )	K	450
fuel flowrate (W <sub>f</sub> , LPG)	kg/sec	0.0120454
total LHV	MJ/hr	2010.198988

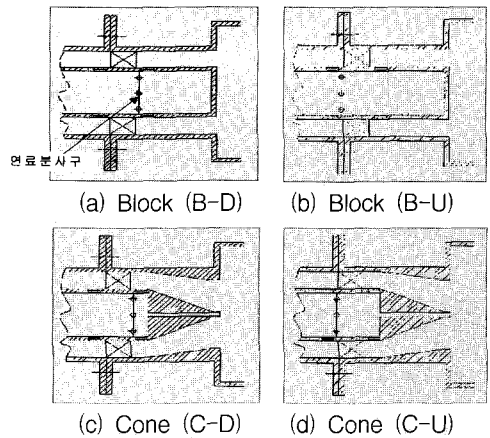


Fig. 1 Various types of air/fuel pre-mixer

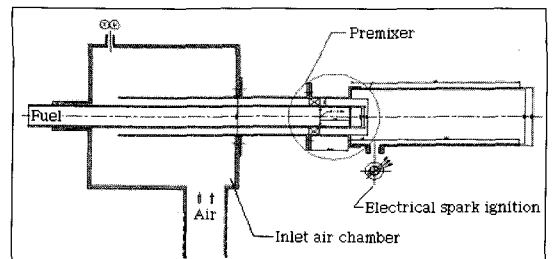
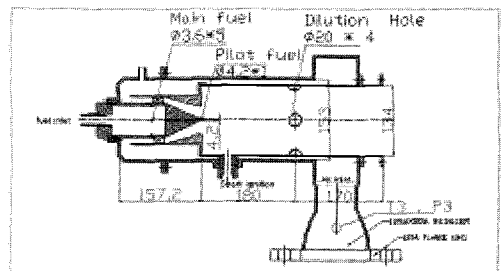
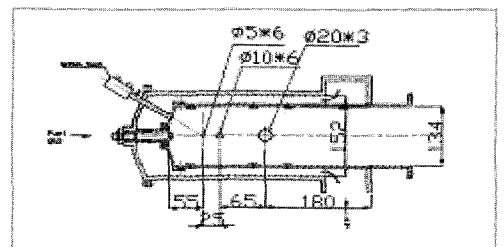


Fig. 2 Combustor of the primary reaction zone



(a)Lean premixed low NO<sub>x</sub> combustor



(b) Conventional combustor

Fig. 3 Drawings of lean premixed low NO<sub>x</sub> combustor and conventional combustor

후에 그리고 혼합거리를 이동시킬 수 있는 예혼합기를 구성하였다. 연료로 이용한 LPG의 유속은 혼합기내에서의 연료/공기의 혼합거리와 공급 연료의 압력을 고려 50m/sec로 설계하였으며, 예혼합기의 출구중심부에 총 연료량의 10%의 연료를 공급할 수 있는 연료 공급구를 설치하여 연소시 화염의 안정성을 도모하였다.

예혼합기의 형상은 주로 주연소 영역에 영향을 미치기 때문에 실험의 편의상 주연소 영역의 연소 특성만을 평가할 수 있도록 Fig. 2와 같이 주연소 실험용 연소장치를 제작하였다. 예혼합기의 연소특성을 확인하기 위해서는 실제 연소기에 적용할 필요가 있으며 Table 1의 기본 설계를 바탕으로 Fig. 3과 같이 LPG용 가스터빈 연소기를 제작하였다. 연소기의 구조는 역류통형 연소기로서 연소실 출구부 외곽에서 공급된 연소용 공기가 연소실 외벽을 통하여 상류부로 유동되어 희석 공기공과 예혼합기를 통하여 연소실에 공급되게 구성되어 있다. 그리고 주연소 영역, 이차연소 영역, 희석연소 영역으로 구성된 동일용량의 기존형 연소기(conventional combustor)를 이용하여 배출가스 분포에 대한 연소특성을 비교할 수 있게 하였다.

## 2.2 주변장치

주변장치는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 연료 및 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어 있다.

연소용 공기 공급은 풍압 2,000mmAq(0.2atm), 풍량 55Nm<sup>3</sup>/min(4000kg/h)의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며, 열교환기를 통하여 실험조건에 온도까지 가열된다. 열교환기로 공급되는 연소용 공기는 별도의 송풍기를 설치하여 공급하였으며, 연소기의 초기점화는 전기 스파크 점화기를 이용하였다.

승온된 연소용 공기의 온도는 K-type 열전대를 사용하여 측정하였고, 연소기 내부의 화염 및 연소기 출구부의 온도측정은 R-type 열전대를 이용하였으며 열전대로부터 측정된 고온 가스의 온도 값에 대한 복사 열손실 및 전도 등에 의한 오차 등은 보정하지 않았다. 연소기 출구에서의 배기가스는 연속 측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였으며, 배기가스의 포집은 고온의 배기가스를 고려하여 삼중관 구조의 수냉식 포집관을 이용하였다.

## 2.3 실험방법

Table 1의 설계점 조건에서 연소실험을 하기 위해서는 고압 및 고온의 공기가 필요하며 이 경우 실험설비 등이 대형화되기 때문에 대부분의 연구자들은 개발 초기에 연소실 내 공기 유동을

동일하게 모사하여 연소실험을 수행하며, 최종적으로 실제조건에서 연소실험을 수행하여 연소특성을 확인하는 방법을 택하고 있다[10]. 본 연구의 연소실험도 이와 같은 방법으로 상압의 조건에서 성능실험을 수행하였다. 실험시 배출가스 측정은 연소기의 라이너 출구방향 중심부분에서 측정하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 예혼합기 특성실험

Figure 5는 제작된 Fig. 1의 예혼합기와 Fig. 2의 주연소 실험장치를 이용하여 설계점인 Table 1을 기준으로 일정 연료량에서 주연소 영역에 공급되는 연소용 공기를 상온(298K), 상압(대기압)으로 하는 경우 당량비 변화에 대한 CO와 NOx의 연소기 출구 중심에서의 농도를 O<sub>2</sub> 15%를 기준으로 환산하여 나타내었다.

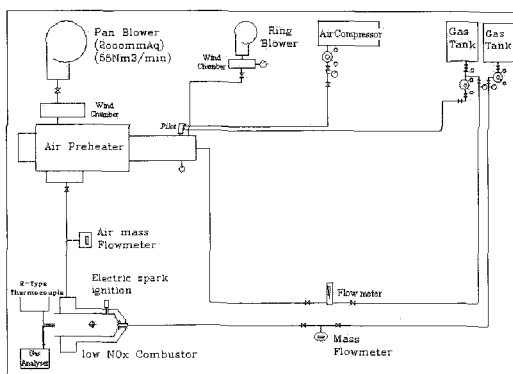
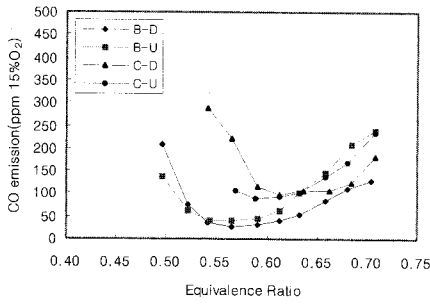


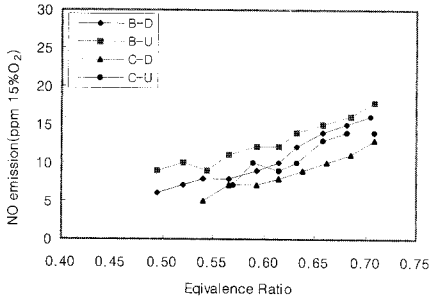
Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

Figure 5 (a)의 CO 배출 특성 결과로부터 소염이 발생되지 않는 당량비 0.5이상에서 당량비가 증가할수록 화염온도 증가에 의한 원활한 연소반응으로 CO의 배출이 감소되지만 당량비 0.6이상에서는 연소용 공기가 연료로의 공급이 원활하지 못하게 되어 CO의 배출이 오히려 증대됨을 알 수 있다. Fig. 5 (b)의 NO 배출 특성 결과로부터 당량비가 증가하면 연소용 공기 공급량이 감소되고 이에 따라 화염온도가 증가하기 때문에 NO의 배출이 증가하는 경향을 보인다.

Figure 6은 Fig. 5와 동일한 방법으로 설계점 온도인 고온(450K) 공기에 대하여 상압 연소실험을 수행한 결과이다. Fig. 6 (a)의 CO 배출은 Fig. 5 (a)의 결과와 동일한 경향의 특성을 보이지만 고온의 연소용 공기를 공급하면 보다 낮은

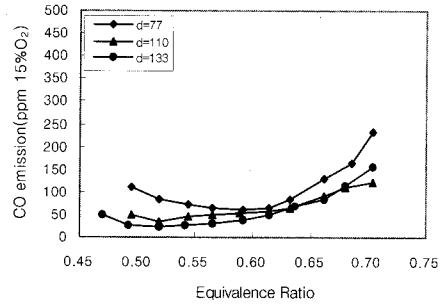


(a) CO

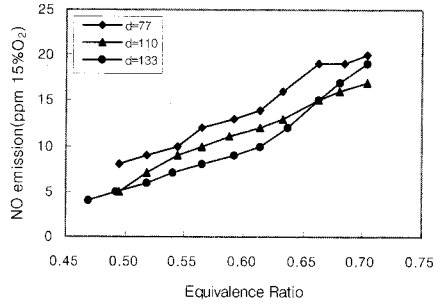


(b) NO

Fig. 5 CO & NO emission for various types of air/fuel pre-mixer ( $T_{air}=298K$ )

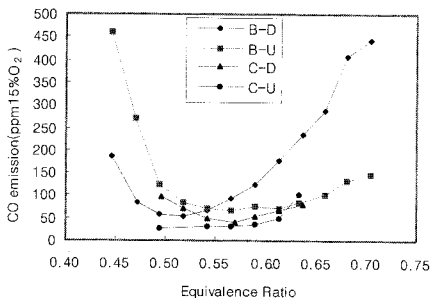


(a) CO

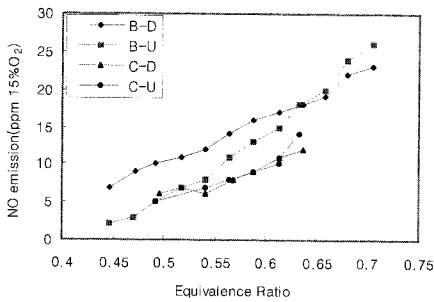


(b) NO

Fig. 7 CO & NO emission for cone (C-U) type of air/fuel pre-mixer ( $T_{air}=450K$ )



(a) CO

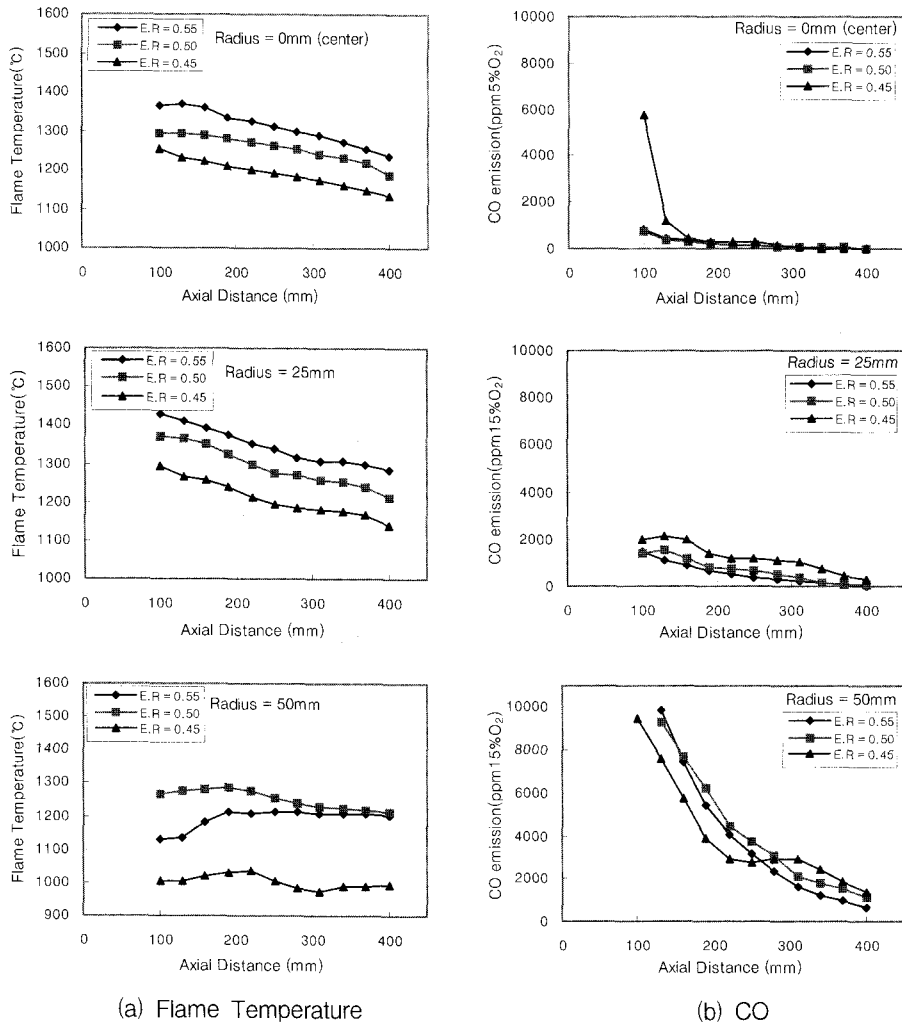


(b) NO

Fig. 6 CO & NO emission for various types of air/fuel pre-mixer ( $T_{air}=450K$ )

당량비에서도 화염이 존재함을 알 수 있다. 즉 고온의 공기를 공급하면 낮은 당량비에서도 상온의 연소용 공기를 이용하는 것 보다 화염의 온도가 상대적으로 높게 되어 희박연소 구간에서의 연소안정성이 증가했기 때문임을 예상할 수 있다. Fig. 6 (b)의 결과로부터 NO배출은 저온의 공기를 공급하는 Fig. 5 (b)의 결과와 같이 당량비 증가에 따라 NO가 증가하는 동일한 경향을 보이지만 상대적으로 보다 높은 농도를 나타내고 있다. 이는 공급되는 공기의 온도 증가만큼 연소 영역의 온도가 상승되기 때문으로 예상된다.

Figure 5와 Fig. 6의 결과로부터 콘형태의 예혼합기는 블록형태의 예혼합기에 비하여 Bluff body 효과가 없고 연소기 입구 면적의 확대비가 높아 자기 외부 재순환 강도가 증가하기 때문에 생성가스의 공급에 의하여 상대적으로 고온 영역이 냉각되기 때문에 높은 당량비에서 소멸되지만 주연소영역이 냉각되기 때문에 CO의 배출은 증대되고 NO의 발생은 적게 되는 것으로 예상된다. 연료분사구가 선회기 상류에 있는 경우 혼합시간이 증대되어 혼합가스의 혼합특성이 좋아지기 때문에 NO의 발생은 적어지는 것으로 예상되지만 상온의 공기를 사용하는 경우 상대적으로 고온의 점(Hot Spot)의 영향이 커지게 되기 때문에 이러한 영향은 나타나지 않는 것으로 생각되며



(a) Flame Temperature (b) CO  
**Fig. 8** Flame temperature & CO concentration for C-U type of air/fuel pre-mixer ( $T_{air}=450K$ )

추후 이에 대한 규명이 필요할 것으로 생각된다.

Figure 6의 결과로부터 예혼합기의 형상은 Fig.1 (d)의 연료분출구가 선회기 전단에 설치되어 있는 콘 형태의 예혼합기(이하 C-U 예혼합기)가 CO와 NO의 배출이 비교적 적게 됨을 알 수 있다.

예혼합 영역의 길이는 Fig. 6의 결과에서 언급하였듯이 혼합특성에 영향을 미치게 된다. 예혼합 영역의 길이에 대한 영향을 알아보기 위하여 C-U 예혼합기를 이용, 예혼합 거리에 대한 연소 특성 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Figure 7 (a)의 CO 배출특성 결과 예혼합 영역의 길이가 증가할수록 예혼합 영역에서의 연료/공기의 혼합특성이 향상되기 때문에 연소영역에서의 미연 가스인 CO 배출은 감소됨을 확인할

수 있다. 그리고 Fig. 7 (b)의 결과로부터 예혼합 영역의 길이가 증가할수록 동일한 이유로 예혼합 영역의 연료/공기의 혼합특성이 증가함으로써 주연소 영역의 국부적 고온부(hot spot)가 감소되어 NO의 발생이 감소됨을 알 수 있다. 따라서 예혼합 영역의 길이가 증가할수록 연소 효율과 저 NOx 특성은 좋을 것으로 확인된다. Fig. 8은 주연소 영역내의 연소특성을 예상하기 위하여 예혼합영역 길이 95mm의 C-U 예혼합기를 이용, 주연소실의 당량비별 반경 및 축방향(라이너 길이방향)에 따른 CO 농도 및 온도를 측정된 결과이다.

본 실험조건에서 당량비 조건에 따라 CO의 농도가 계측기의 한계를 넘는 경우가 있기 때문에 예혼합기 출구 100mm 이후에서 계측을 수행하

있다. Fig. 8 (a)의 온도분포로부터 당량비가 감소할수록 연소용 공기의 공급량이 증가하여 주연소 영역의 온도는 감소함을 확인할 수 있으며, 출구로 진행될수록 외부로의 열손실 등으로 온도가 저하된다. Fig. 8 (b)의 CO 농도 분포 결과로부터 축방향 150mm 이후에는 연소가 활발한 영역은 존재하지 않는 것으로 예상할 수 있다. 또한, 연소실 중심부보다 외부의 CO 농도가 높게 측정되었는데 이는 연소영역이 연소실 중심보다는 바깥쪽에 존재하기 때문이다. 그리고 당량비가 낮을수록 축방향으로 향하는 연료/공기 혼합가스의 유속증가로 인하여 연소영역이 중심부로 이동하는 것으로 예상된다.

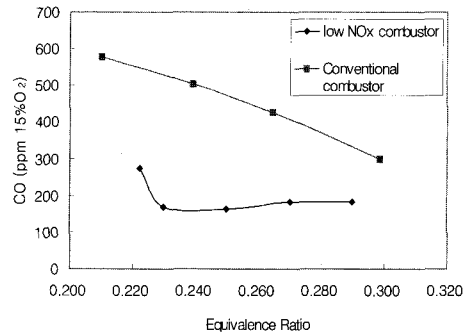
### 3.2 희박 예혼합 연소기의 성능실험

C-U 예혼합기의 출구에서 180mm 위치에 직경 20mm 크기의 4개, 희석공기구를 설치한 Fig. 3 (a)의 연소기를 이용하여 연소실험을 수행하였으며 희박 예혼합 연소기의 연소특성을 확인하기 위하여 Fig. 3 (b)의 동일 용량, 기존형 연소기 (conventional combustor)를 이용하여 동일한 공기 공급온도 (450K)에서의 배기가스 특성을 Fig. 9에 비교하였다.

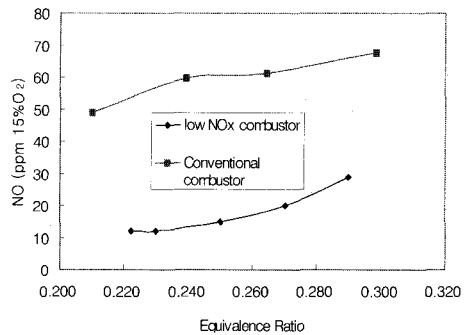
Figure 9 (a)의 CO 배출 결과로부터 화염 안정성 관점에서 주연소 영역으로 연소용 공기를 적정 배분하여 공급한 기존형 연소기는 당량비가 증가할수록 연료로의 공기 공급이 원활하게 되어 CO의 배출은 감소된다. 그러나 희박 예혼합 연소기는 당량비에 따라 예혼합기의 혼합특성에 많은 영향을 받기 때문에 일정한 경향을 보이지 않으며 당량비가 0.24보다 낮은 연소 구간에서는 연료로의 과다한 공기공급으로 인하여 CO의 배출이 급격하게 생성되는 반면 0.24보다 높은 연소 구간에서는 연료로의 공기공급 부족 등으로 인하여 CO의 배출이 오히려 증가됨을 알 수 있다. 본 실험범위에서 희박 예혼합 연소기와 기존형 연소기를 비교하면 예혼합실에서 연료/공기의 혼합특성을 지녀 연소가 원만히 이루어진 희박 예혼합 연소기가 기존형 연소기에 비하여 CO 배출은 전반적으로 적게 발생됨을 알 수 있다.

Figure 9 (b)의 NO 배출 결과로부터 기존형 연소기와 희박 예혼합 연소기 모두 당량비가 증가함에 따라 NO의 배출이 증가하는 결과를 볼 수 있으며, 전반적으로 모든 당량비 조건에서 희박 예혼합 연소기의 NO 배출이 현저하게 감소한 결과를 볼 수 있다. 이는 희박 예혼합 연소기의 경우가 연료/공기의 예혼합 특성과 동일 당량비 조건에서 주연소 영역의 연소온도에 많은 영향을 끼치기 때문으로 생각된다.

따라서 Fig. 9의 결과로부터 희박 예혼합 연소기가 기존형 연소기에 비하여 NO 및 CO의 배출



(a) CO



(b) NO

Fig. 9 CO & NO emission of lean premixed low NOx combustor and conventional combustor

과 화염 안정성이 좋은 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서 주연소 영역의 연소특성을 지배하는 예혼합기를 제작하여 각 형상별 연소특성을 예상하였으며 NO와 CO의 배출 관점에서 선정된 예혼합기를 희박 예혼합 연소기에 적용하여 기존형 연소기와 성능을 비교하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 예혼합기는 설계점 온도에서 Block형에 비하여 Cone형이 CO와 NO의 배출이 적게 배출된다.
- (2) 희박 예혼합 연소기는 기존형 연소기에 비하여 연료/공기의 예혼합 과정이 존재하기 때문에 전반적으로 CO와 NO의 배출이 적다.
- (3) 희박 예혼합 연소기는 당량비가 증가함에 따라 기존형 연소기에 동일한 경향으로 NO의 배출이 증가한다.
- (4) 화염 안정성 관점에서 연소조건 범위는 기존형 연소기에 비하여 희박 예혼합 연소기가 좁은 범위에 있다.

## 참고문헌

- [1] Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill.
- [2] Mellor, A. M., 1990, Design of Modern Turbine Combustor, Academic Press..
- [3] H. Cohen, G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamutto, 1987, "Gas Turbine Theory(3th)", Longman Scientific & Technical
- [4] 윤천석, 김수용, 전승배, 천세창, 조병도, 박상선, 2002, "2002 신기술 동향조사 보고서-가스터빈 엔진", 특허청 기계금속분야 제 4권
- [5] Alan S. Feitelbery, Michael A. Lacey, 1997, "The GE Rich-Quench-Lean Gas Turbine Combustor" ASME 97-GT-127
- [6] Peter Griebel et al., 1997, "Experimental Investigation of an Atmospheric Rectangular Rich Quench Lean Combustor Sector for Aeroengines" ASME 97-GT-146
- [7] 오군섭, 안국영 외, 1997, "터보기계 설계기술 개발에 관한 연구", 한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.
- [8] 오군섭, 안국영 외, 1997, " 터보제너레이터 및 관련 유체기계의 공력설계 및 해석기술(I)", 한국기계연구원 연구보고서
- [9] 안국영, 김한석, 배진호, 조은성, 1998, "가스 터빈 연소기 기본형상 결정을 위한 성능실험", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제6호, pp.840-848.
- [10] "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", 1980, Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A.
- [11] C. T. Bowman, 1975, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion", Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 1, pp. 33~45
- [12] C. T. Bowman, 1973, "Kinetics of Nitric Oxide Formation in Combustion Processes", 14th symposium on Combustion, pp 729~737