

희박-예혼합 저 NO_x 연소기 설계에 대한 연구

임암호* · 김한석** · 안국영** · 이상민** · 김용모***

The Study for Designs of Lean-Premixed low NO_x Combustor

Am-Ho Lim, Han-Suck Kim, Kuk-Young Ann, Sang-Min Lee, Yong-Mo Kim

ABSTRACT

The concept of lean-premixed combustion in gas turbine combustor operation has become a standard in recent years as an effective means to meet stringent environmental standards on NO_x emissions. Various types of air-fuel premixer, which affect greatly NO_x emission and stability of lean-premixed low NO_x combustor, were investigated experimentally to reduce the NO_x emission. One type of the premixers is selected by experiments and applied it to 70kW class lean-premixed gas turbine combustor. The exit temperature and emissions of CO and NO_x were measured with equivalence ratios at ambient pressure. From the results, the emissions of CO and NO_x were influenced by the type of air-fuel premixer. As the mixing length of air and fuel is longer, the NO_x and CO emission were decreased in the primary reaction zone. Compared with of conventional combustor, the lean-premixed low NO_x combustor has low NO_x emission characteristics.

Key Words : Lean Premixed Combustion(희박 예혼합 연소), Reverse flow type(역류 통형방식), Low NO_x(저 NO_x), Gas Turbine Combustor(가스 터빈 연소기), Pre-mixing chamber(예혼합실), air preheater(공기 예열기)

1. 서론

가스터빈 연소기는 압축기로부터 나온 고온, 고압의 공기를 연료와 반응시켜 높은 에너지를 갖게 하고 이를 터빈으로 전달하여 기계적 에너지를 얻게 하는 역할을 수행하는 부분이다.

최근 환경문제가 심각하게 대두됨에 따라, 가스터빈 엔진의 배기가스 공해물질을 줄이기 위하여 다양한 저공해 연소기의 개발이 진행 중이며, 그 방법으로는 연소영역의 화염온도 제어에 의한 배기가스의 감소(가변형상, 다단연소), 희박-예혼합 예증발 연소(Lean-Premixed Prevaporized combustion), 농후 급냉각 희박 연소(Rich Quick quench Lean burn combustion), 촉매 연소(Catalytic combustion)와 같은 연구가 개발되고 있다.[1,2,3] 이러한 저 NO_x 연소기술 중 현재

널리 사용되고 있는 기술로는 희박-예혼합 연소(lean-premixed burning), 과농-희박 연소(rich-lean burning) 및 촉매 연소(catalytic burning)가 있다. 희박-예혼합 연소 방법은 초기에 연소용 공기를 가연한계에 가깝게, 연료와 다량의 공기를 예혼합 함으로써, 주연소 영역의 온도를 저하시켜 NO_x를 저감시키는 방법이며, 과농-희박 연소는 주연소 영역의 연소에 필요한 공기량보다 공기를 적게 공급하여 연료과농 상태로 연소를 시키므로 화염온도를 저하시키고 그 후류 쪽에 공기를 다량으로 공급하여 희박연소 시킴으로서 화염이 최고 고온영역이 되는 부분을 가능한 축소함(quenching)으로서 NO_x를 저감하는 연소 방법이다. 최근에 촉매를 사용하여 보다 낮은 온도 영역에서 연소를 가능하게 하여 NO_x를 저감시키는 촉매 연소 방법이 있으나 아직 내구성 등 해결하여야 할 문제점이 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 가스터빈 연소기에 가장 적합한 기술로 평가되고 있는 희박-예혼합 연소방식을 채택하였으며, 그에 따른 희박-예혼합 연소기의 적정설계인자를 도출하기 위하여 예

* 한양대학교 기계공학과 대학원

† 연락처자, pass762000@hanmail.net

** 한국기계연구원(KIMM)

*** 한양대학교 기계공학부

혼합 연소영역을 지배하는 예혼합기를 여러 가지 형태로 제작하여 연소특성을 평가하였다. 그중 적정 예혼합기를 선정, 세부특성을 평가한 후, 희박-예혼합방식의 가스터빈 연소기를 설계·제작하여 저 NOx 특성 등에 대한 연소실험을 수행하였다.

2. 희박-예혼합 연소기 설계

2.1 연소기 및 예혼합기의 설계

연소기의 구조는 크게 케이스, 라이너 및 집화장치로 구성되어 있다. 연소기 설계는 일반적으로 공기역학적 관점에서 전압손실계수의 결정 및 화학반응적 관점에서의 연소효율 또는 배기가스의 특성 등으로부터 연소기의 단면적을 구한 후 연소기의 지름, 길이 등 주요크기를 결정하는 것으로부터 시작된다.

본 연구에서는 한국기계연구원에서 개발된 설계용 프로그램(KACOM)을 이용하여 설계된 70

kW급 저 NOx형 연소기로서 설계에 관련한 구체적인 설계결과는 안 등의 결과를 참고하기 바란다.[12,13,14] 또한 설계된 연소기의 설계사양은 Table. 1에서 보는 바와 같다. 연소기 입구압력은 349.3kPa로서 연소기 입구부터 출구까지 4%의 압력손실을 가지며 입구공기 온도는 450K의 조건을 가진다. 연료는 상용 LPG를 사용하였다. 예혼합 희박연소기의 특성을 지배하는 예혼합기는 형상에 따라 혼합특성에 영향을 받기 때문에 비교적 보편적으로 이용되고 있는 Fig. 1과 같은 두가지 모형의 예혼합기를 제작하였다.

Table. 1의 설계점에서 연소기에 공급되는 연소용 공기 총량 중 혼합기에 공급되는 공기량은 당량비 0.55를 기준으로 하였으며 이 때의 공기 유속은 압력손실을 고려하여 57m/s로 하였다. 그리고 LPG의 유속은 혼합기내에서의 공기/연료의 혼합을 고려 50m/s로 하여 설계하였다.

2.2 실험장치 구성 및 실험방법

2.2.1 실험장치

사용된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연료 및 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어 있다. 연소용 공기 공급은 풍압 2000mmAq, 풍량 55Nm³/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며, 연소용 공기는 예열기를 거쳐 필요한 온도까지 가열된다. 열교환기로 공급되는 연소용 공기는 별도의 송풍기를 설치하여 공급하였으며, 연소기내 최초점화는 전기식 스파크 점화기를 이용하였다. 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 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다. 연소기 출구에서의 배출가스는 연속 측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였으며, 배출가스의 포집은 고온 및 배가스의 연소등을 고려하여 물로 냉각을 할 수 있는 이중관 구조를 갖는 수냉식 프로브를 이용하였다.

2.2.2 실험방법

예혼합기의 특성은 주로 주연소 영역에 영향을 미치기 때문에 실험의 편의상 주연소 영역의 특성만을 평가할 수 있도록 Fig. 3과 같이 주연소 실험용 연소장치를 제작하였다. 제작된 연소기를 통하여 상온(298K)과 고온(450K)조건에서의 각 예혼합기에 따른 성능실험을 수행하였으며, 그에 따른 실험데이터(data)는 연소기 출구부에서의 배가스 분포, 출구온도 및 화염형상을 측정함으

Table. 1 Design Point Specification

구분	단위	값
Wa	kg/sec	0.701
P ₃	kPa	349.3
T ₃	K	450
Qa	m ³ /sec	0.262062391
Wf (LPG)	kg/sec	0.0120454
Total LHV	MJ/hr	2010.198988
Pressure loss ratio	%	4
Pressure loss	kPa	13.972
T ₄	K	1120

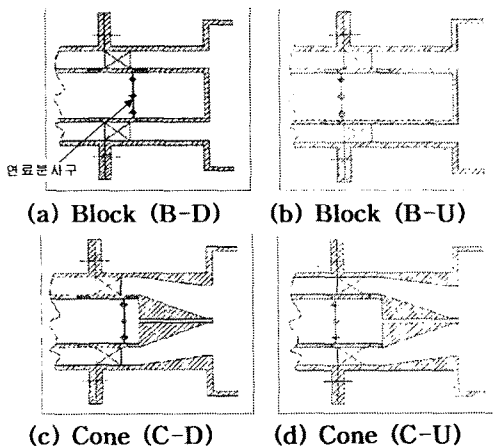


Fig. 1 Various types of experimental air/fuel pre-mixer

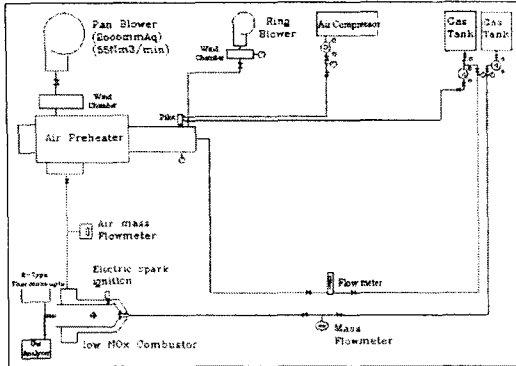


Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

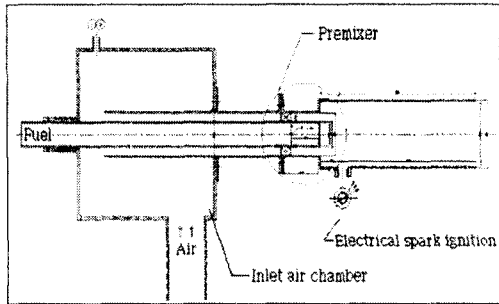


Fig. 3 Special Combustor for Primary combustion test

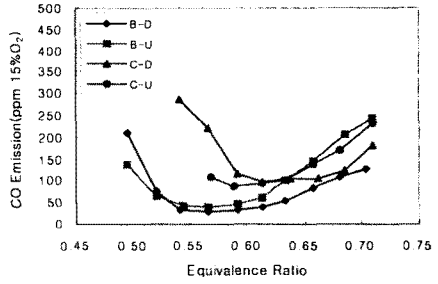
로써 희박연소 한계 및 연소특성을 파악하도록 하였다. 또한 위 실험을 토대로 선정된 최적의 예혼합기를 이용하여 당량비에 따른 라이너 내부의 연소특성을 관찰하였다. 상온(298K)와 고온(450K)일때의 입구공기량은 각 온도에 따른 당량비별 연소기내에서 동일한 속도를 가지도록 연소용 공기의 체적유량이 같도록 공급하였으며(체류시간 동일), 연료량은 설계점으로부터 얻은 일정유량을 기준으로 공급하였으며 그에 따른 입구 공기유량을 조절하여 당량비를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 마지막으로, 주연소 영역의 실험을 토대로 선정된 최적의 예혼합기를 적용하여 예혼합 희박 연소기를 설계·제작하였으며, 제작된 저 NOx 연소기의 배가스 특성을 비교하고자 기존 연소기의 배가스 분포와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

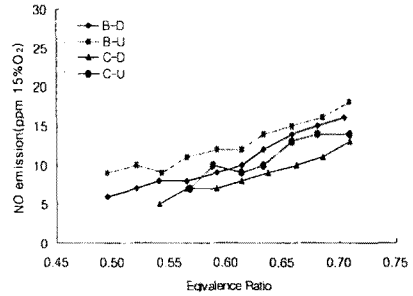
3.1 예혼합기 성능실험

3.1.1 상온(298K), 상압 조건

Fig. 4는 제작된 Fig. 1의 예혼합기를 이용하여 설계점인 Table. 1을 기준으로 일정 연료량에서



(a) CO



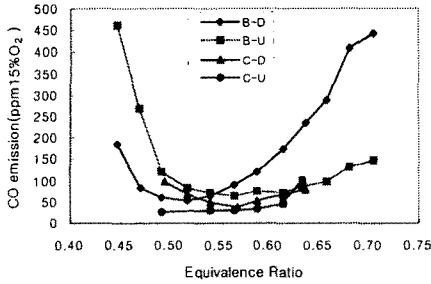
(b) NO

Fig. 4 CO & NO emission for various types of Air/Fuel Pre-mixer ($T_{air}=298K$)

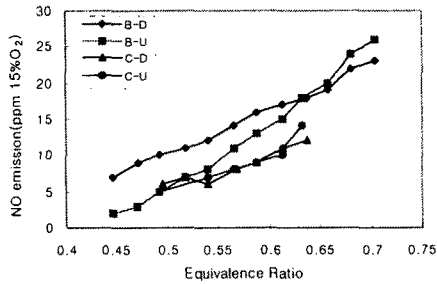
상온(298K), 상압(대기압)의 연소용 공기를 이용하여 주연소 영역에 공급되는 공기의 당량비 변화에 대한 CO와 NO의 배출 특성을 나타내었다. Fig. 4 (a)의 CO 배출 특성결과로부터 당량비 0.6 기준으로 CO의 배출 특성이 변하게 됨을 알 수 있다. 당량비가 0.6이하인 경우 과잉공기에 의한 연소영역의 냉각으로, 당량비가 0.6이상인 경우 연소용 공기가 연료로의 공급이 원활하지 못하게 되어 CO의 배출이 각각 증대됨을 알 수 있다. Fig. 4 (b)의 NO 배출특성 결과로부터 당량비가 증가하면 연소용 공기 공급량이 감소되고 이에 따라 화염온도가 증가하기 때문에 NO의 배출이 증가됨을 알 수 있다.

3.1.2 고온(450K), 상압 조건

Fig. 5는 위 상온조건 실험에서와 동일한 방법으로 설계점 온도인 고온(450K) 공기에 대하여 연소실험을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 5 (a)의 CO 배출은 Fig. 4 (a)의 결과와는 달리 당량비가 0.55 기준으로 특성이 변하게 됨을 알 수 있다. 이것은 연소용 공기가 고온으로 공급됨으로서 화염이 안정화되고 그에 따른 안정적인 희박연소영역이 증가하기 때문이며, 동일 당량비 조건에서 연소용 공기를 고온으로 공급하면 상대적으로 연소반응이 활발해져서 CO의 배출이 감



(a) CO



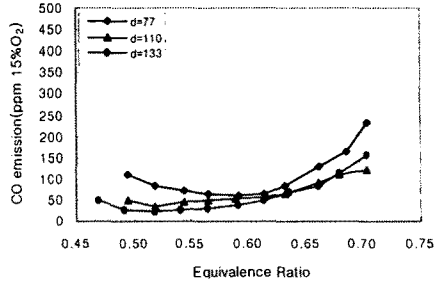
(b) NO

Fig. 5 CO & NO emission for various types of Air/Fuel Pre-mixer ($T_{air}=450K$)

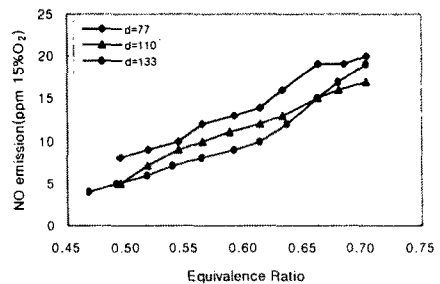
소된다. Fig. 5 (b)의 NO배출은 Fig. 4 (b)와 동일한 경향을 보이며 고온의 공기를 공급하는 경우 연소영역이 고온으로 되어 NO의 배출이 증가된다. 실제 온도조건에서 실험을 수행한 Fig. 5의 CO와 NO 배출특성 결과로부터 예혼합기의 형상은 Fig. 1의 (d)가 가장 연료/공기의 예혼합 특성이 양호하여 CO와 NO의 배출이 억제되었으며, 연소영역에 공급되는 공기의 적정 당량비는 초기 설계조건인 0.55정도임을 예상할 수 있다.

3.2 예혼합거리 변화

예혼합 영역의 길이는 혼합특성에 영향을 미치며 이에 대한 영향을 알아보기 위하여 Fig. 5에서 선정된 예혼합기인 Fig. 1의 (d) 예혼합기를 이용하여 예혼합 영역의 거리 즉 연료분사 영역과 연소실입구 거리 변화에 대한 연소특성 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a)의 CO 배출특성 결과, 예혼합 거리가 증가할수록 예혼합 영역에서의 연료/공기의 혼합특성이 좋아지기 때문에 연소영역에서의 미연가스인 CO 배출은 감소됨을 알 수 있다. 그리고 Fig. 6 (b)의 결과로부터 예혼합 거리가 증가할수록 동일한 이유로 예혼합 영역에서의 연료/공기의 혼합특성이 증가함으로써 주연소 영역의 국부적 고온부가 감소되어 NO의 발생이 감소됨을 알 수 있다. 따라서 예혼합



(a) CO



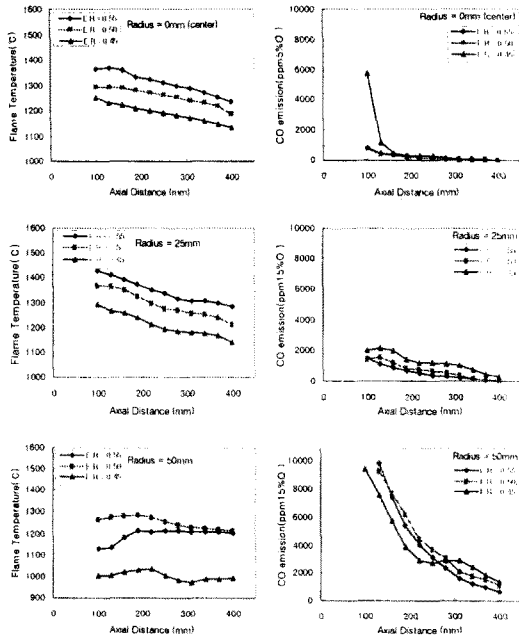
(b) NO

Fig. 6 CO & NO emission for Cone (C-U) type of Air/Fuel Pre-mixer ($T_{air}=450K$)

거리가 증가할수록 연소효율과 저 NO_x 특성은 좋을 것으로 예상된다. 그러나 예혼합 거리가 너무 크면 연소기의 길이가 커지는 단점이 있다. 본 실험결과와 연소기의 길이 등을 고려하면 예혼합 거리는 90 - 100mm 정도가 타당할 것으로 생각되며 본 설계에서는 예혼합 거리를 95mm로 하였다.

3.3 라이너 내부 연소특성

주연소 영역내의 연소특성을 예상하기 위하여 위 실험을 토대로 선정된 예혼합영역 길이 95mm, Cone (C-U) 혼합기를 이용하여 주연소실에서의 당량비에 따른 반경 및 축방향에 대한 CO 농도 와 내부온도(화염온도)를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 7 과 같다. 본 실험조건에서 당량비 조건에 따라 CO의 농도가 계측기의 한계를 넘는 경우가 있기 때문에 예혼합기 출구부 100mm 이후에서부터 계측을 수행하였다. Fig. 7 에서 (a)의 온도분포로부터 당량비가 감소할수록 파인공기가 공급됨으로서 주연소 영역의 온도는 감소함을 확인할 수 있다. Fig.7. (b)의 CO 농도 분포 결과는 라이너 축 중심보다 외부영역이 높게 나타나는데 이것은 산소농도와 온도분포를 고려하여 볼 때 라이너 중심부는 고온의 재순환 선회가스 공급으로 연소반응이 활발하지만 중심에



(a) Temperature (K) (b) CO

Fig. 7 Combustion characteristics for Primary zone of C-U type ($T_{air}=450K$)

서 멀어지면 고온의 재순환 선회가스 공급이 없을 뿐만 아니라 벽면으로의 열손실에 의하여 연소반응이 지연되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 회석 공기구의 위치를 결정하는 경우 반응이 종료되는, 즉 CO의 농도가 낮게 수렴되는 하류로 결정하는 것이 유리하지만, 그렇게 하게 되면 연소기의 길이가 과대하게 되므로 회석 공기구의 위치는 중심부의 CO의 농도 분포를 고려할 때 축방향으로 180mm 정도에 위치하는 것이 타당할 것으로 생각되며 추후 확인 실험을 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

3.4 예혼합 회박연소기의 저 NOx 특성

예혼합기 성능실험을 통하여 선정된 Fig. 1 (d)의 예혼합기와 세부연소특성을 통하여 도출된 예혼합기 출구에서 180mm에 회석공기구를 설치한 회박-예혼합 연소기를 Fig. 8와 같이 제작하여 연소실험을 수행하였다. 설계된 Fig. 8의 회박-예혼합 연소기의 연소특성을 확인하기 위하여 기존에 성능실험이 수행된 동일 용량의 기존형 연소기(Conventional combustor)를 이용하여 동일한 실험조건인 고온(473K), 상압의 공기조건에서 배가스 특성실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 9에 비교하였다.

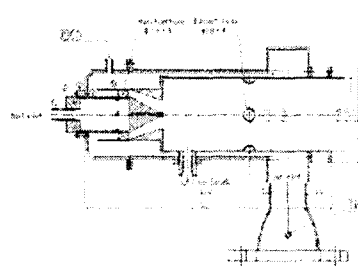
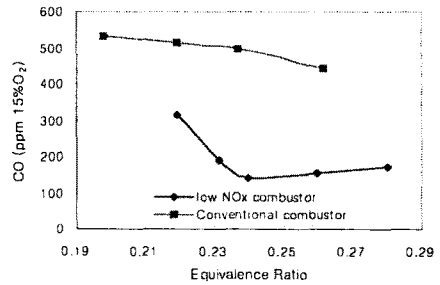
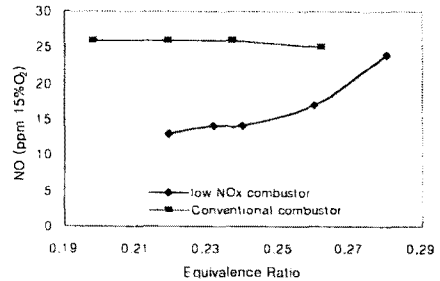


Fig. 8 Drawings of lean premixed low NOx combustor



(a) CO



(b) NO

Fig. 9 CO & NO emissions for lean premixed low NOx combustor and conventional combustor

Fig. 9의 결과로부터 회박-예혼합 저 NOx 연소기의 배가스 생성특성이 저감됨을 확인할 수 있었으며, 당량비 0.27조건에서 CO와 NO의 배출이 현저하게 감소됨을 볼 수 있었다. 특히 NO의 배출은 40%까지 저감됨을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 주연소영역의 연소특성을 지배하는 여러 종류의 예혼합기를 제작하여 성능실험을 수행하였으며, 실험결과 최적의 예혼합기를 선정하였다. 선정된 예혼합기를 회박 연소기에 적용

하여 성능을 평가하였고 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주연소영역의 연소특성을 지배하는 예혼합기는 설계점 온도에서 Block형에 비하여 Cone형이 혼합특성이 좋고 연료분출구가 선회기 이전에 설치된 것이 우수하였다.
- (2) 선택된 Cone형 예혼합기는 주연소영역의 공기공급 당량비 0.55조건에서 안정성을 확인할 수 있었다.
- (3) 예혼합거리가 증가할수록 혼합특성이 향상되어 연소효율과 저 배가스 특성을 지님을 확인할 수 있었다.
- (4) 라이너 내부의 연소특성 결과로부터 당량비 별 연소특성을 예상할 수 있었으며, CO의 농도로부터 적절한 희석공기공의 위치를 선정할 수 있었다.
- (5) 기존 연소기와의 배가스 비교시 CO & NO 모두 현저하게 저감되는 특성을 보이며, NO는 최대 40% 적게 배출됨을 확인할 수 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] "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", 1980, Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A.
- [4] J. M. Ballester, C. Dopazo, N. Feuyo, M. Hernandez and P. J. Vidal, 1997, "Investigation of low NOx strategies for natural gas combustion ", Fuel Vol. 76. NO. 5. pp. 435~446
- [5] C. T. Bowman, 1973, "Kinetics of Nitric Oxide Formation in Combustion Processes", 14th symposium on Combustion, pp 729~737
- [6] G. A. Lavoie, J. B. Heywood, and J. C. Keck, 1970, "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines" Combust. Sci. Tech., Vol. 1, pp 313
- [7] A. M. Mellor, 1976, " Gas Turbine Engine Pollution " Energy Combustion. Sci., 1976. Vol. 1. pp. 111-113
- [8] A. H. Lefebvre, 1984, " Fuel Effects on Gas Turbine Combustion-Liner Temperature, Pattern Factor and Pollutant Emissions", AIAA-84-1491.
- [9] 오군섭, 안국영 외, 1997, "터보기계 설계기

술 개발에 관한 연구", 한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.

- [10] 오군섭, 안국영 외, 1997, " 터보제너레이터 및 관련 유체기계의 공력설계 및 해석기술(I)", 한국기계연구원 연구보고서
- [11] 안국영, 김한석, 배진호, 조은성, 1998, "가스터빈 연소기 기본형상 결정을 위한 성능실험", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제6호, pp.840~848.
- [12] Suzuki, K., "カスターヒン 燃焼器の設計" 内燃機関, vol. 21, no. 259, 1982, pp.77-85