예혼합 희박연소 가스터빈 연소기의 저 NOx 특성

배형수*, 안국영**, 박종일*, 안진혁**, 김용모***

The Low-NOx Characteristics of Premixed Lean-Burn Gas Turbine Combustor

H. S. Pae*(HYUG), K. Y. Ahn** (KIMM), J. I. Park*(HYUG),
J. H. Ahn**(KIMM), Y. M. Kim***(HYU)

Key Words : Combustor(연소기), Primary zone(주연소영역), Dilution zone(희석영역), Primary hole(주연소공기공), Dilution hole(희석공기공), CO(일산화탄소), NOx(질소산화물), Flame temperature(화염온도), Premixed chamber(예혼합실), Pilot fuel(보조연료),

Abstract

The combustion characteristics for the low NOx 50 kW-class gas turbine combustor have been experimentally investigated. In order to achieve the premixing and the lean burn combustion, the geometries of the primary zone including premixed chamber were modified from conventional combustor. The centerline profiles of CO and NO concentration, and temperature were measured for the premixed combustors with or without dilution holes in the liner. The effects of the pilot fuel injection rate and air dilution on flame stabilization and pollutant (CO, NO) emission are discussed in detail.

1. 서 론

최근 환경 규제가 엄격하여짐에 따라 저배기 연소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가스터빈의 경우에도 대부분의 연구가 NOx 저감기술에 초점이 맞추어지고 있다. 따라서, 새로운 개념의 연소기술이 등장하고 이를 응용한 다양한 저 NOx 연소기가 개발되어 실용화되어 지고 있다.[1] [4]

기존의 가스터빈 연소기는 연료가 연소용 공기와 주연소영역에서 혼합하여 이론당량비보다 조금 낮은 당량비로 비예혼합 화염을 형성하는 형식으로, 50ppm이하의 NOx배출량(15%O_2)을 얻기는 어렵다. 기

* 한양대학교 대학원
** 한국기계연구원
*** 한양대학교 기계공학부

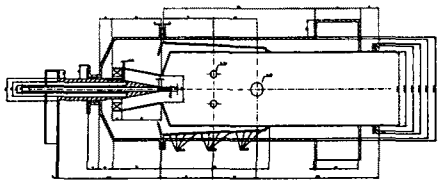

Fig. 1 Lean premixed gas turbine combustor

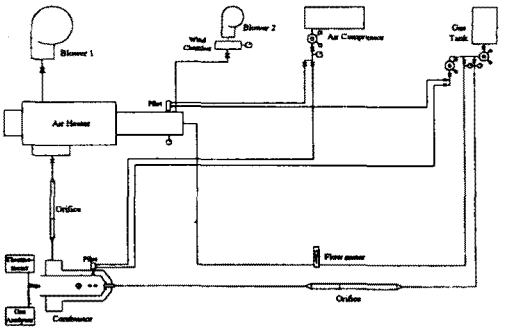

Fig. 2 schematic diagram of experimental apparatus

존 연소기의 주연소영역에 물 또는 수증기를 분사하여 NOx를 저감시키기도 하나 이 경우에는 물속에 포함된 철분을 제거(demineralization)하여야 하므로 운용비용이 많이 들고 CO 및 소음이 증가하는 등의 결점이 있다. 현재 널리 사용되고 있는 저 NOx 연소기술로는 희박 예혼합 연소(lean-premixed burning)를 들 수 있으며, 이 방법은 초기에 연료와 공기를 미리 혼합시키므로서 혼합특성을 향상시키는 동시에 연소용 공기를 가연한계에 가깝게 다량 공급하여 줌으로서 화염온도를 저하시켜 열적 NOx를 저감시킨다. 또 다른 접근방법으로는 주연소영역에서 연료과농상태로 연소를 시키므로 화염온도를 저하시키고 그 후류쪽에 공기를 급속히 불어 넣어 주어(quenching) 화염의 최고온도대를 피하므로 NOx를 저감하는 과농-희박 연소(rich-lean burn) 방법이 있다. 이 방법은 고온의 입구조건에서도 역화나 자연점화 등의 위험이 없고 작동성이 뛰어나며 액체연료가 질소를 함유하고 있을 경우에 적합하다는 등의 이점이 있으나, 공기냉각(quench)에 한계가 있어 국부적인 고온부위가 생겨 NOx가 발생할 가능성이 크고, CO 나 HC이 충분히 산화될 수 있도록 시간이 길어야 하는 등의 제한으로 말미암아 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 유망한 NOx 저감 방법중의 하나이나 아직 실용화되지는 못하고 있다. 최근에는 촉매를 사용하여 보다 낮은 온도영역에서 연소를 가능하게 하여 화염온도를 떨어뜨림으로써 NOx를 저감시키는 촉매연소 방법이 도입되어 실용화를 시도하고 있으나 아직 내구성 등 해결하여 할 문제점이 있는 것으로 알려지고 있다.

본 연구는 기 개발된 50kW급 가스터빈 연소기의 저 NOx화에 대한 것으로, 예혼합 희박 연소기술을 채용하여 연소기를 설계하였으며 성능실험을 수행하여 성능을 평가하고 문제점을 파악하였다.[5],[6]

2. 연소기

연소기 설계는 일반적으로 전압손실계수의 결정으로부터 연소기의 단면적을 구한 후 연소기 지름, 길이 등 주요크기를 결정하는 것으로부터 시작된다. 첫단계인 전압손실계수의 결정도 설계자의 경험 및 개발용도 등에 따라 설계자가 결정하여야 한다. 이 경우 기존에 개발된 연소기에 대한 많은 데이터가 축적되어 있으면 설계자는 별 어려움없이 전압손실계수를 결정할 수 있으나, 그렇지 못한 경우에는 설계자가 많은 시행착오를 겪은 후에야 전압손실계수를 결정할 수 있을 것이다. 이와 같이 연소기는 사용목적 및 용도를 비롯하여 설계자의 경험과 의도 등 여러 변수에 의하여 설계되고 있다. 본 연구는 기존

연소기를 저 NOx 연소기로 개조하는 것으로, 기존 연소기의 크기는 변경하지 않고 예혼합에 의한 주연소영역의 혼합특성 향상 및 희박연소에 의한 저 NOx를 목표로 예혼합실과 주연소영역의 설계에 주안점을 두었다.[7],[8]

본 연구에서 설계·제작하여 실험에 사용한 연소기는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 라이너 내경 98.6mm, 길이 385mm인 역류 통형 연소기로서, 역류의 공기유입부는 실제 엔진에서와 같은 크기 및 위치에 설치하였다. 사용된 연료는 상용 LPG이며, 주연료는 지름 2mm인 12개의 구멍을 가진 노즐을 원주방향에 설치하여 예혼합실(premixed chamber)에서 공기와 혼합되도록 하였다. 화염 안정화를 위한 보조연료(pilot fuel)는 1.5mm의 지름을 가진 노즐을 통하여 연소실로 직접 분사된다. 선회기는 내경 30mm, 외경 56mm의 원통형 실린더내부에 연료공급관을 중심으로 같은 축에 위치하고 있으며 선회각은 45°, 날개수는 12개로 하였다. 고온에서 라이너 보호를 위하여 기존의 막냉각방식과는 다른 공기충돌 냉각방식(impingement cooling)을 채택하였다. 공기충돌 냉각을 위하여 3mm, 4mm, 5mm 지름의 공기공들을 원주방향으로 36개씩 12열로 가진 공기충돌 냉각장치를 설치하여 라이너 표면의 온도가 1000K를 넘지 않도록 하였다. 연소기의 점화는 재순환영역 출구 근방에 토치점화기를 설치하여 점화시키도록 하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 연료 공급장치, 연소용 공기 공급장치, 연소기 및 계측장치 등으로 구성되어있다. 연료는 상용 LPG로 프로판(C_3H_8) 90 %, n-부탄(C_4H_{10}) 10%이며, 유량은 체적 유량계를 사용하여 유량계의 기준압력과 온도를 가스의 실제 정압과 온도에 대하여 보정하여 사용하였다. 연소용 공기의 공급은 풍압 2000mmAq, 풍량 55Nm^3/min의 용량을 가지는 송풍기를 통하여 공급하였으며, 공기유량의 경우에는 오리피스 유량계를 이용하여 측정하였다. 연료가스와 공기의 온도는 T-type 열전대를, 연소기출구에서의 온도측정은 K-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 연소기 내부의 화염온도측정은 연소기 내부온도를 측정할 수 있도록 특별히 제작된 R-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 열전대로부터 측정된 고온 가스의 온도값에 대한 복사 열손실 및 전도에 의한 오차 등은 보정하지 않았다.

연소기 출구에서의 배기가스는 연속 측정이 가능한 가스분석기(Greenline MK2)를 이용하여 측정하였으며, 배기가스의 포집은 고온 및 배기가스의 연소 등을 고려하여 물로 냉각할 수 있는 구조를 갖는 프로브를 별도로 제작하여 측정하였다.

보조연료 비율에 따른 화염안정도 및 배기가스특성을 파악하기 위하여 전체 연료는 일정하게 유지하면서 주연료와 보조연료 비를 변화시켜가면서 실험하였으며 각 조건에 있어서 당량비에 따른 영향도 살펴보았다. 한편, 주연소영역에서의 연소특성을 파악하기 위하여 희석공기공이 없는 라이너에 대하여 성능실험을 수행한 후 실험결과를 통하여 얻어진 당량비를 기준으로 희석공기공의 크기를 결정한 후 이에 대한 실험을 수행하였다.

또한, 혼합특성 및 연소특성을 파악하기 위하여 내부 온도장과 내부 가스장을 측정하였다. 연소기 출구부의 배기가스 성분은 설계점에서 뿐만 아니라 각각의 부하

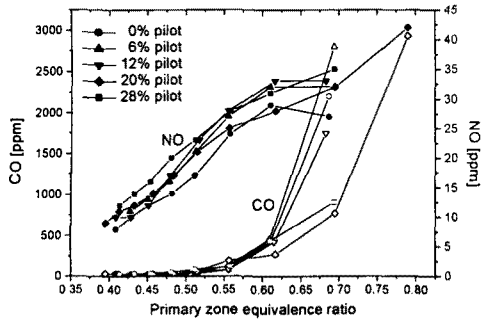

Fig. 3 CO and NO emission for the primary zone equivalence ratio and the ratio of pilot fuel (without dilution hole)

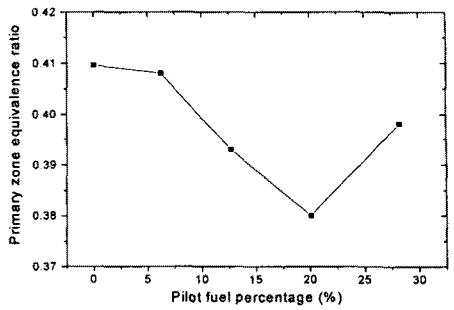

Fig. 4 The flame off point for the ratio of pilot fuel (without dilution hole)

에 따라 측정하므로써 연소특성을 평가하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에서 보는 바와 같이 주연소영역에서의 당량비와 보조 연료비율에 따른 CO와 NO의 영향을 살펴보았다. 실험에서는 연료량을 고정시키고 공기량을 변화시켜가면서 당량비를 결정하였다. 당량비를 감소시킬 경우 혼합특성이 증가하므로 CO와 NO 모두 감소하는 경향을 띄고 있다. CO의 경우에는 당량비가 감소함에 따라 혼합특성이 양호하여 생성량이 감소하고 NO의 경우에는 당량비가 감소하면서 혼합특성 증가와 함께 화염온도가 낮아지면서 생성량이 감소하고 있다. 특히 보조연료 비율이 0%일 경우에는 연소실에서의 예혼합된 연료의 양이 많아서 NO의 생성량이 적음을 알 수 있다.

Fig. 4는 희석공기를 주입하지 않은 경우 당량비를 감소시키면서 화염이 꺼지는 점들을 연결한 것으로 화염이 소멸할 때의 당량비를 나타내고 있다. 보조연료 비율이 0%에서 20%까지는 보조연료비율이 증가함에 따라 연소가능한 당량비가 낮아지고 있지만 보조연료 비율이 20%를 초과하면 오히려연소 가능한 당량비가 높아진다. 즉 낮은 보조 연료비에서는 보조연료는 화염을 안정시키는 역할을 하지만 보조연료 비율이 점차 증가되면서 분사되는 가스의 속도가 증가하게 되어 주연소영역의 화염장을 관통하여 분사된 가스가 화염을 안정시키는 역할을 못하게 된다. 주연소영역의 당량비는 보조연료를 주입하지 않은 경우에는 당량비 0.43까지 안정한 화염을 얻을 수 있었다. 따라서, 주연소영역의 당량비를 0.43으로 하였을 경우의 희석공기공의 지름 18mm (전체 당량비는 설계점인 0.25) 및 초기 설계에서 결정된 주연소영역의 당량비 0.47인 경우의 희석공기공의 지름 20mm인 라이너를 제작하여 연소기 출구에서의 CO와 NO를 측정하였다.

Fig. 5는 희석공기공의 지름이 20mm인 라이너에 대한 실험결과이며 출구 당량비가 감소함에 따라 화염온도가 낮아지고 체류시간이 짧아져 NO는 감소하고 CO는 증가하고 있음을 알 수 있다. 당량비가 0.4 이상일 때는 혼합특성이 불량하여 출구 당량비가 감소함에 따라 화염온도가 낮아져 NO와 CO 모두 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 6은 희석 공기공 지름이 18mm인 라이너에 관한 실험이다. 지름이 20mm인

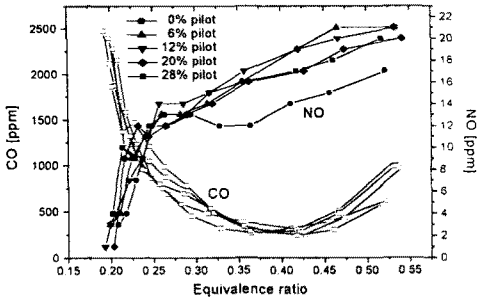

Fig. 5 CO and NO emission for equivalence ratio and the ratio of pilot fuel (with dilution hole of 20mm diameter)

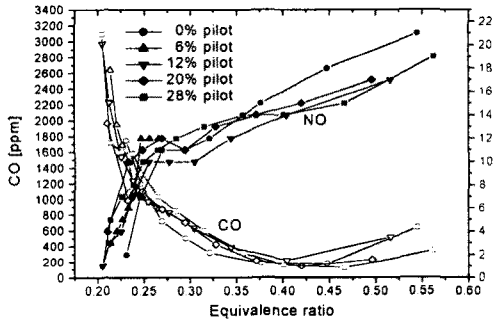

Fig. 6 CO and NO emission for equivalence ratio and the ratio of pilot fuel (with dilution hole of 18mm diameter)

희석공기공을 가진 라이너의 경우와 CO 및 NO 값이 다소 다르나 유사한 결과를 나타낸다.

이상과 같은 결과로부터 희석 공기공이 있는 경우는 희석공기공이 없는 경우와 비교하면 연소기 출구에서 NO는 감소하고 CO는 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 이 영향을 보다 상세히 살펴보기 위하여 내부 가스장과 온도장을 측정하였다.

Fig. 7은 희석 공기공이 없는 경우에 설계점에서의 주연소영역 당량비가 0.43인 경우와 0.687인 경우에 대한 내부 온도장을 나타낸 것이다. 두가지 경우 모두 전체적으로는 비슷한 경향을 나타내고있다. 노즐목 근방에서는 예혼합된 공기에 의하여 초기에 급격하게 연소가 일어난 후 주연

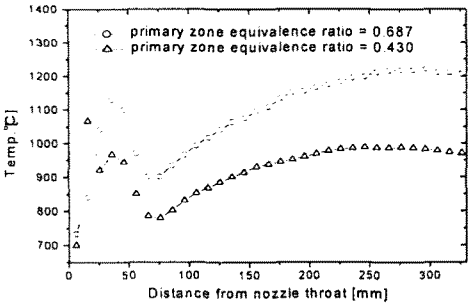

Fig. 7 Centerline profiles of temperature (without dilution hole)

소 공기공(primary hole)으로 유입되는 공기공급에 의하여 온도가 떨어지게 된다. 주연소공기공 후류에서는 미연 혼합물이 주연소 공기공에서 유입된 공기에 의하여 연소하며 온도가 상승하고 있다. 이것은 예혼합실의 혼합특성이 불량하여 주연소 영역에서 연소가 완전히 일어나지 못하기 때문이다. 당량비 0.43인 경우 약 25mm 지점에서 온도가 국부적으로 감소하는 것은 점화토치를 장착시 라이너와의 틈새를 통하여 한방향으로 공기가 들어오기 때문이다. 하지만 당량비 0.687의 경우에는 공기의 유속이 약하기 때문에 중심선의 온도에는 영향을 미치지 못해 그 부분에서 온도가 감소하지 않는다.

Fig. 8은 희석 공기를 공급하지 않는 경우에 대하여 내부가스장을 측정한 것이다. 주연소영역 당량비 0.43의 경우 처음에 상당량의 CO가 생성된 후 주연소 공기공을 지나면서 감소하기 시작하여 연소기 출구쪽으로 갈수록 일정한 값을 나타낸다. 입구쪽에서 CO 값이 높은 것은 연료와 공기의 혼합이 불량한 것으로 사료된다. 한편 NO는 주연소 공기공을 지나면서 약간의 미연 혼합기체의 연소로 인하여 약간 증가하는 경향을 띤다. 주연소영역 당량비 0.687의 경우에는 상당히 다른 결과를 나타내는데 주연소 영역에서 연료와 공기의

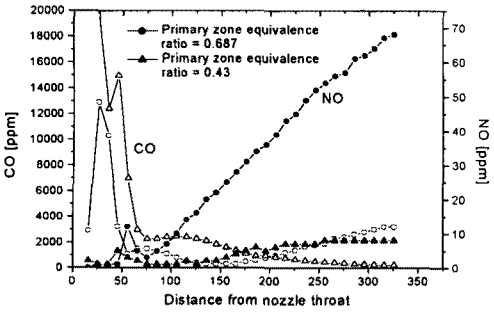

Fig. 8 Centerline prefiles of CO and NO emission (without dilution hole)

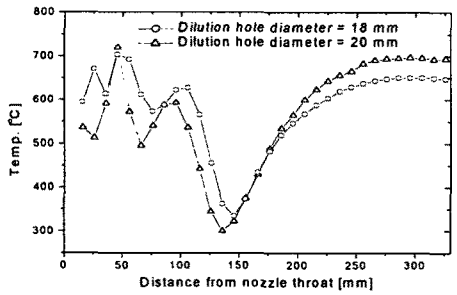

Fig. 9 Centerline profiles of temperature (with dilution hole)

혼합이 제대로 이루어지지 않아 연소기 후단에서도 상당량의 미연 혼합기체가 연소하게 되어 화염온도가 상승함으로 NO의 생성량이 점차 증가함을 알수 있다.

Fig. 9는 희석공기공의 지름이 18mm와 20mm인 경우의 라이너 내부 온도장을 나타내고 있다. 주연소 공기공의 지름이 크게 차이가 나지는 않아서 두 경우 모두 비슷한 경향들을 보이지만 예상과는달리 희석 공기공의 지름이 18mm인 경우의 주연소영역 온도가 오히려 높게 나타나고 있다. 또한, 희석 공기공을 지난 후로는 희석공기에 의하여 온도감소가 일어날 것으로 예상하였으나 연소가 계속 일어나 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 즉, 주연소영역에서의 혼합특성이 좋지 않아 희석공기공을 지나도 연소가 계속 일어나

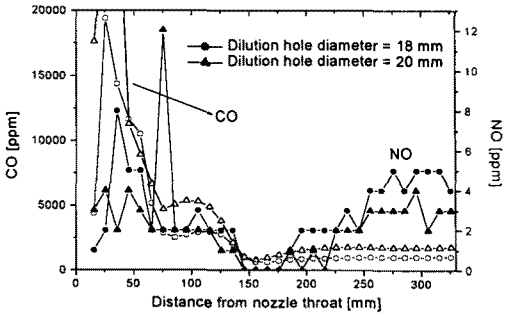

Fig. 10 Centerline profiles of CO and NO emission (with dilution hole of 20mm diameter and 18mm diameter)

고 있다.

Fig. 10은 18mm 희석 공기공을 가진 라이너와 20mm 희석 공기공를 가진 라이너에 대한 연소기 내부 가스장을 나타낸다. NO는 주연소 영역에서 소량이 생성되다 희석공기에 의하여 희석된 후 출구 쪽으로 진행하면서 미연가스의 연소에 의하여 온도가 증가하게 되어 약간씩 증가한다. CO는 초기에 혼합 강도가 불량하여 급격히 증가하다 공기의 유입으로 연소가 활발히 일어나면서 감소하게 되며 희석공기공을 지나면서 냉각이 되어 일정한 값을 갖는다.

이상과 같은 결과로부터 주연소 영역의 혼합특성이 불량한 것으로 나타났으며, 이는 선회기를 통과한 연소용 공기와 연료와의 혼합이 잘 이루어지지 않았기 때문이라 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 보조 연료비에 따라서 화염안정도가 영향을 받는 것을 관찰할 수 있었으며 보조연료 쪽의 비율을 증가해 감에 따라서 보조연료가 총연료량의 20%가 될 때 까지는 화염안정도가 증가하게 되나 보조연료

비율이 더 커지게 되면 분사되는 보조 연료의 속도가 너무 커지게 되어서 화염장을 관통하여 화염안정에 더 이상 기여하지 못하게 된다.

2) 같은 당량비라 하더라도 희석공기가 유입됨에 따라 혼합특성이 변화하므로 출구 배기가스 특성이 달라짐을 알 수 있었다.

3) 당량비를 감소하여 가연한계영역에 접근함에 따라 적정한 연소영역에서는 소음과 진동이 그리 크지 않았으며 화염이 꺼지는 영역으로 갈수록(20mm 라이너의 경우는 출구 당량비 0.2 이하) 소음과 진동이 심하며 불안정해졌다.

4) 예혼합실에서의 연료와 공기의 혼합특성이 불량하여 주연소 영역에서 연소가 완전히 이루어지지 못하고 희석영역까지 연소가 진행됨을 알 수 있었다. 따라서, 예혼합실의 혼합특성 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) 1980, "The Design and Development of Gas Turbine Combustors", Northern Research and Engineering Corporation, Woburn, Massachusetts, U.S.A

(2) A. H. Lefebvre, 1983, Gas Turbine Combustion, McGraw-Hill

(3) A. M. Mellor, 1990, Design of Modern Turbine Combustor, Academic Press.

(4) Micho Kuroda, Yoji Ishibashi " Development of a Low-NOx Combustor", Hitachi Review Vol. 38 (1989), No. 3

(5) 오군섭, 안국영 외, 1997, " 터보기계 설계기술 개발에 관한 연구", 한국기계연구원 연구보고서, UCN 304-521.M.

(6) 오군섭, 안국영 외, 1997, " 터보제너레이터 및 관련 유체기계의 공력설계 및 해석기술(Ⅰ)", 한국기계연구원 연구보고서

(7) 안국영, 김한석, 배진호, 조은성, 1998, "가스터빈 연소기 기본형상 결정을 위한 성능실험", 대한기계학회논문집 B권 제22권 제6호, pp.840-848.

(8) 안진혁, 안국영, 김한석, 배형수, 김용모, 1998, "가스터빈 연소기의 성능 평가", 대한기계학회 1998년도 추계학술대회 논문집 B, pp. 305-310 KSME 98F250