

촉매연소기에서 2단 공급공기와 연료가 NO_x 저감에 미치는 연구

NO_x Reduction with Secondary Air and Fuel in a Catalytic Combustor

정진도* · 이보영¹⁾

호서대학교 환경공학과, ¹⁾호서대학교 대학원 환경공학과

(2003년 7월 9일 접수, 2003년 9월 9일 채택)

Jin-Do Chung* and Bo-Young Lee¹⁾

Department of Environmental Engineering, Hoseo University,

¹⁾Department of Environmental Engineering, Graduate School, Hoseo University

(Received 9 July 2003, accepted 9 September 2003)

Abstract

A basic experimental study was conducted in order to find the optimum combustion control technology to decrease the thermal NO_x by applying the catalytic combustion method with natural gas. NO_x emission increased with increasing space velocity due to temperature rising in the furnace. In order to overcome the low resistance to high temperature, secondary air was supplied to the CST combustor. The following secondary fuel formed combustible mixture in part, which resulted in steep increase of the exiting temperature of the 2nd catalyst bed. It led to the more generator of NO_x, 30~60% of the 1st catalyst bed. It might be due to the potential increase of thermal NO_x.

Key words : Catalytic combustion, Fuel NO_x, Thermal NO_x, Preheating temperature, CST catalytic combustion, Hybrid catalytic combustion

1. 서 론

연소 중 발생하는 NO_x는 공기중의 산소가 고온에서 탈리되어 질소분자를 산화시켜 생성되는 thermal NO_x, 연료중의 질소성분이 연소 중에 산화되어 생성되는 fuel NO_x, 그리고 연소시 연료로부터 발생하는

탄화수소기가 질소와 반응하여 생성되는 prompt NO_x로 구분된다. 대부분의 연소장치에서 생성되는 NO_x의 대부분을 thermal NO_x이다. 이러한 thermal NO_x는 연소온도가 높을 때, 산소농도가 높을 때, 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길어 질 때 많이 생성된다.

NO_x의 처리방법으로서는 연료에서 근본적으로 질소화합물을 제거하는 연료탈질화법과 연소과정에서 NO_x를 줄이는 연소개선법 및 배기가스를 처리하는

* Corresponding author

Tel : +82-(0)41-540-5743, E-mail: jdchung@office.hoseo.ac.kr

후처리법 등이 있으며, NO_x 배출을 억제하기 위한 1차적인 접근방법으로는 연소개선 방법이 고려된다.

이 중 촉매연소 기술은 NO_x와 HC 발생을 가장 극소화할 수 있는 방안이다. 일반 화염연소의 경우 연소실의 국부온도가 thermal NO_x의 급격한 생성온도인 1,500°C보다도 높게 상승하기 때문에 NO_x 생성량이 많아진다. 반면, 이것을 해결하기 위하여 주로 선택되는 촉매연소는 연소개시 온도가 화염연소의 연소개시 온도보다 낮고, 고체표면에서 연소가 일어나기 때문에 연소에 의해 생성된 열을 이용하여 thermal NO_x 생성온도 이하인 비교적 저온 또는 저농도의 연료를 산화시키는 것을 말한다. 이것은 연소 중 NO_x 생성을 크게 줄이면서도 저온 영역에서 복사 전열효과를 최대화할 수 있는 신연소 기술로 알려져 오고 있다(Klvana *et al.*, 1996).

그러나 연소조건 개선에 의한 NO_x 생성억제에는 한계가 있고 전 세계적으로 강화되는 배출규제를 만족시키기 위해서는 근본적으로 질소함량이 낮은 청정연료로의 대체가 추진되고 동시에 fuel NO_x를 감소시키는 종합적인 NO_x 저감책이 요구되므로, 최근에는 메탄이 주성분인 천연가스의 사용이 날로 증가되어 가는 추세이다(Song *et al.*, 1981).

따라서 본 실험에서는 천연가스를 연료로 사용하여 예열온도에 따른 촉매의 반응성을 향상시킴으로써 노 내의 온도 상승을 억제하고, 이에 따른 NO_x 발생율과 연소 영역범위에서 산소농도가 NO_x 발생에 미치는 영향을 고찰 하였다. 또한 촉매를 다단으로 설치하여 공간속도에 따른 NO_x 배출과, 고온촉매의 내열성을 극복하기 위하여 hybrid 촉매연소법을 시도하여 2단 공기 공급과 2단 연료 공급에 따른 NO_x 배출특성을 조사하여 연소효율도 만족시키면서 NO_x도 저감시킬 수 있는 산업용 촉매연소기에 적용하기 위한 기초실험을 수행하였으며, 향후 최적 촉매연소제어 기술을 확립하기 위한 기초실험 데이터의 확보가 본 실험의 목적이다.

2. 실험 및 방법

2.1 중/고온 촉매 제조

중·고온 촉매로 활발하게 연구가 진척되고 있는 것은 발전용 및 자동차용 가스터빈, 대형보일러, 항

Table 1. The oxidation and activation potential of activated metals for a few gases.

Gas	Activated metal
Methane	Pd>Pt>Co>Cr>Mn>Cu>Ce>Fe>V>Ni>Mo>Ti
Proprane	Pt>Co>Cr>Pd, Mn>Cu>Ni>Fe>Ce, Th
Propylene	Pt>Pd>Ag>Co>Cu>Mn>Cr>Cd>V, Fe, Ni>Ce
H ₂	Pd>Pt>Ru>Ag>Co>Au>Ni>Cu>Mn>Fe>Cr
CO	Pd, Pt, Mn>Co>Cd>Ag>Cu>Ni>Sn>Zn>Ti>Fe

공기용 제트엔진 등에 응용하기 위한 것으로 Thermal NO_x 발생이 적으면서 고온에도 견디는 촉매연소기술을 표 1에 요약하였다. 고온형 촉매연소용 촉매는 다음과 같은 조건이 요구된다; ① 낮은 산화 개시온도(점화온도) ② 낮은 예열온도 ③ 촉매표면상에서 균일연소 ④ 높은 용적 연소율 ⑤오염물질 발생 저감 ⑥ 뛰어난 내고온성 및 내열 충격성 ⑦ 낮은 압력손실과 높은 기계적 강도의 구조 ⑧ 다양한 연료의 사용가능 ⑨ 저렴하면서도 장기 사용 가능.

메탄가스에 대한 활성금속은 Pd이 가장 우수하나 여러 조건 등을 선택하여 Pt계 촉매가 많이 이용된다. 담체는 형태에 따라 pellet, foam, fiber, honeycomb 등으로 분류된다. 이 중 honeycomb 담체가 압력손실이 가장 낮기 때문에 가장 널리 이용된다. Honeycomb 구조체는 내열성과 열충격에 강하며 열 팽창율이 적은 재질이 적합하며, 일반적으로 Cordierite (2MgO · 5SiO₃ · 2Al₂O₃)가 많이 사용되고 있다. 본 실험에서도 Cordierite (300 cell/in²)를 담체로 선정하였다. 사용된 촉매는 TiO₂/Pd/La-Al₂O₃ 및 ZrO₂/Pd/La-Al₂O₃이다. 담체에 란타늄 2 mol%가 담지된 La-Al₂O₃ (SBa-90/La, 표면적: 90 m²/g, (독) Condea Chemie GmbH사)를 하니컴 표면의 알루미늄 피막으로 질량비 10%가 되도록 입혔다. 팔라듐 (Pd(NO₃)₂, 19.96% Pd, Engelhard Chem. Co.)수용액에 하니컴 담체를 담가 촉매를 입힌 후 100°C에서 건조하였다. 건조한 촉매는 550°C에서 6시간 소성을 하고, 수소로 550°C에서 6시간 환원하여 Pd/La-Al₂O₃ 촉매를 제조하였다. 팔라듐의 함량은 하니컴 기준으로 질량비 1%가 되도록 하였다. Titanium족은 titaniumtetraisopropoxide (Ti[OCH(CH₃)₂]₄, 97%, Aldrich)를 가수 분해한 후, 염산을 첨가하여 제조하였다. 이 티타늄족에 팔라듐 촉매가 담지된 하니컴을 담가서 줄을 촉매에 입힌후 100°C로 건조하였다. 건조된 촉매를

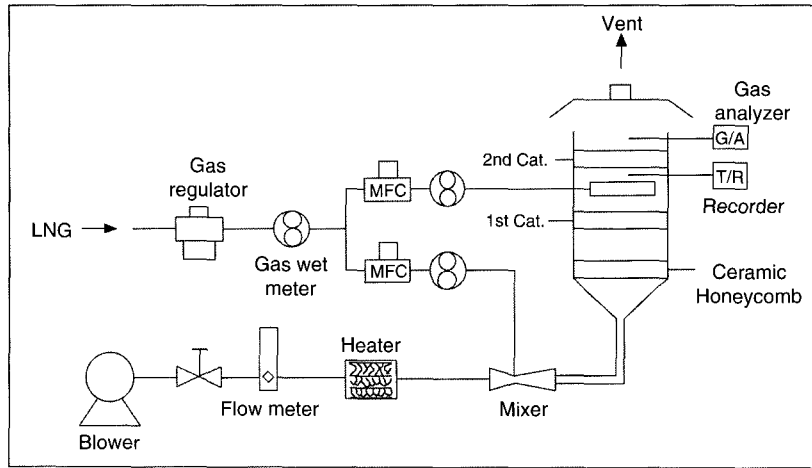


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

800°C에서 수소로 4시간 동안 환원하여 TiO₃/Pd/La-Al₂O₃ 촉매를 자체 제조 하였다. ZrO₃ 코팅도 이와 유사한 방법으로 실시하였다.

2.2 실험장치 구성

본 실험장치는 그림 1과 같이 촉매층 입구에 유입되는 연료가 공기와 예혼합 된후 허니콤을 통과하여 균일하게 공급되지만, 촉매층 출구에서 유입되는 2차 연료는 노즐을 사용하여 연소기 중간부분에서 연료만 분출된다.

연소용 공기는 송풍기(Blower)에서 토출되어 오리피스형 유량계를 거쳐 전기히터로 유입되고, 이 히터내에서 공기는 전기적으로 가열된다. 450°C까지 가열된 공기는 벤츄리 믹서로 공급되고, 이곳에서 1차 연료와 혼합되어 연소기로 공급된다.

연료는 MFC (Mass Flow Controller)로 제어되고, 가스미터에서 계량된 후, 벤츄리 믹서로 공급되어 전기히터에서 가열된 가열공기와 혼합된다. 전기히터는 유로 중에 열선을 설치하여 그곳을 통과하는 유체를 가열하는 구조이기 때문에, 연료가 이 열선을 통과하는 경우에는 연소반응이 일어날 가능성이 있다. 그러므로 이 반응을 차단하기 위하여 사전에 공기만 가열한 후에 벤츄리 믹서에서 가열공기와 연료가 혼합되도록 설계하였다. 2차 연료도 유량계에서 계량된 후 연소기의 중온촉매층과 고온촉매층 사이에 설치된 노즐에서 분출된다.

분위기 온도가 약 1,500°C가 되어도 견딜 수 있도록 연소실 내부는 내화단열용 벽돌로 50 mm 이상 두께로 시공하였다. 고온 촉매연소기는 실험목적에 따라 그림 2에 나타난 것처럼 여러 형상으로 연소실 내부구조를 변경하였고, 또한 연소실 내부를 관찰할 수 있도록 연소기 상부에 투시구를 설치하였으며, 촉매 전후 및 각 부위의 온도를 측정할 수 있도록 열전대를 설치하였다. 그림 2에서 나타난 것과 같이 촉매의 다단 실험시에 촉매층을 2단, 3단 또는 4단이 상으로 촉매층을 쌓아서 연소할 수 있도록 하기 위하여, 연소기의 각 부분을 분해조립이 간편하도록 원통형으로 선반가공 하였다. 내부가 내화물로 된 연소기의 각 부분이 변형 조립이 용이하도록 내열성이 우수한 스텐레스강의 frame으로 제작하였고, 외부로 방열되는 열량을 줄이기 위하여 그 위에 세라믹울(wool)로 연소기 외부를 단열한 후 스텐레스강을 다시 마지막 외부에 설치하였다.

촉매연소기의 전체길이는 440 mm, 전체외경은 230 mm, 각 촉매층의 두께는 10 mm이고 촉매의 가로, 세로 길이는 20 mm이다.

2.3 실험장치 운전

촉매연소기 II, III은 다단촉매연소 실험 수행을 위해 중, 고온 촉매를 다단(3단, 4단)으로 설치하였다. 1, 2차 촉매는 중고온용, 3, 4차 촉매는 고온용 촉매를 선정하여 촉매층을 3단(30 mm) 및 4단(40 mm)으

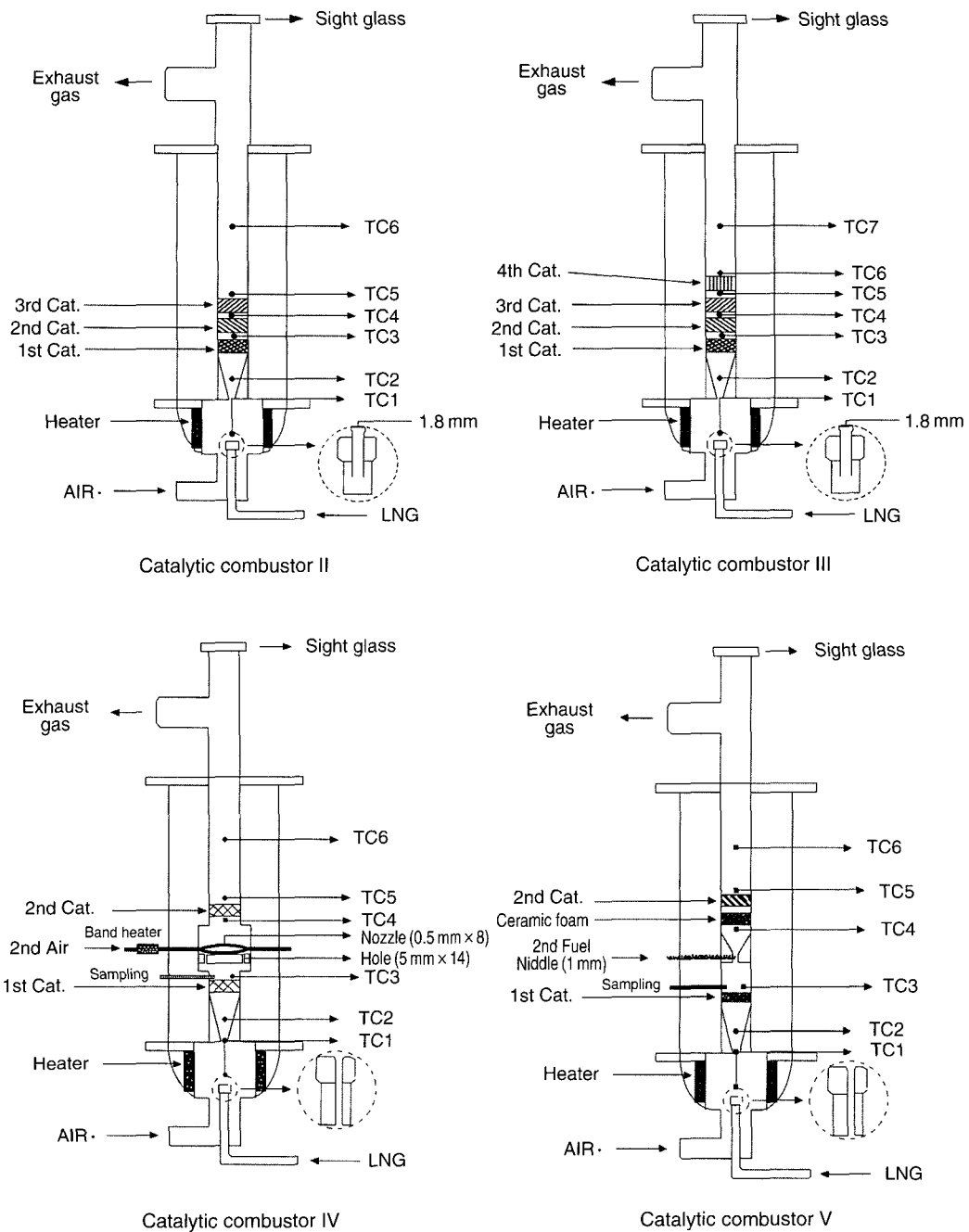


Fig. 2. Test catalytic combustor in this study.

로 변경하여 실험을 수행하면서 각 촉매반응 후의 배기가스 및 온도를 측정하였다.

촉매연소기 IV는 2차 공기 공급에 따른 촉매연소 실험을 수행하기 위해 2차 공기는 heater에 의해 예

Table 2. Catalytic combustor used in this study.

Item	Characteristic
Catalytic combustor II	3-stages
Catalytic combustor III	4-stages
Catalytic combustor IV	Supply of secondary air
Catalytic combustor V	Supply of secondary fuel

열 후 직경 0.5 mm 노즐 8곳을 통하여 1차 촉매 하부에 공급하였다. 1차 촉매반응을 마친 연소가스와 예열된 2차 공기의 균일한 접촉을 위해 1차 촉매 하단에 촉매직경 (50 mm)보다 큰 직경 100 mm 세라믹 울을 장착하였고, 이 세라믹 울에 만들어진 직경 5 mm hole 14개를 통해 연소가스를 통과시켜 확산 효과를 증대시켰다.

촉매연소기 V는 Hybrid 연소를 실험하기 위하여 2차 연료를 공급하는 실험을 수행하였다. 2차 연료 분출 시에는 1차 촉매 하부의 연소기 내부를 원추형 형상으로 제작 후 직경 1 mm niddle을 통하여 공급하였다. 2차 연료를 원추형 내부에 분사하므로 상당한 분출효과를 얻을 수 있었고 niddle을 통해 2차 연료의 분사량을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 2차 공기와 2차 연료가 유입되기 전후의 온도분포와 배기가스 농도를 분석하기 위해 sampling probe를 통해 샘플링을 하여 각각 비교분석 하였다.

2. 4 분석방법

2. 4. 1 온도측정

연소기의 각부의 온도를 측정하기 위하여 연소기 벽면에는 여러개의 측정공을 설치하였다. 공기에 예열 온도 측정시에는 K-type 열전대와 그밖의 반응기의 반응온도는 R-type 열전대를 사용하여 측정하였다. 촉매표면에서의 온도를 측정하기 위해 각 촉매의 표면중앙에 열전대를 설치하였으며, 열전대에서 측정된 온도는 온도기록계 (Hybrid Recorder) (HR-1300, Yokogawa, Japan)를 이용하였다.

2. 4. 2 가스분석

가스분석은 연소가스 분석장치와 총탄화수소 분석 장치를 함께 분석할 수 있도록 구성하였으며, 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소, 이산화탄소 및 산소는 Potable 가스분석기 (PG-250, Horiba., Japan)를 사용하였다. 총 탄화수소 분석장치 (THC, FIA-510, Horiba.,

Japan)를 사용하여 총탄화수소를 분석하였다.

가스 분석을 위한 sampling probe는 1차 촉매층 출구, 2차 촉매층 출구, 연소기 최종 출구부에 각각 설치하였다. 연소기에서 일부 고온가스가 sampling probe를 통해 유입되어 냉각되며, 이 때 발생된 응축 수분과 분진은 탈습, 제진병에서 여과된 후 진공펌프로 유입되고 다시 응축기로 보내진다. 응축기에서는 전자냉각장치를 통하여 3°C까지 냉각시켜 잔여 수분을 제거한 후 두 종류의 가스 분석기 (PG-250, FIA-510)에 적당한 유량으로 각각 나누어 공급시킨다.

PG-250 분석기는 한국표준연구원과 한국가스공업 (주)에서 제조한 표준 시료로 교정하여 사용하였다. 또한 FIA-510은 순수 수소와 고압공기를 FID의 연료로 공급하고, 한국가스공업 (주)가 제조한 1% 메탄을 표준시료로 보정하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 다단 설계에 의한 영향

고온에서 촉매의 활성저하와 담체물질의 상전이 (Phase transition)에 의한 성능저하 문제점을 극복하기 위해 연소기를 변형시켜 촉매안정 열연소 (catalytically stabilized thermal combustion : CST)를 유도하여 촉매연소 특징과 화염연소의 특징을 관찰한 실험이다 (백영순 등, 1997).

촉매층 입구쪽에는 촉매 개시반응을 저온에서 일으킬 수 있는 활성이 좋은 촉매를 설치하고, 그 다음에는 내열성이 우수한 촉매들을 설치하여 연료의 완전연소가 촉매층 내에서 일어나도록 하였다. 다단식 촉매연소기에서 일어나는 연소시 NO_x 발생량을 측정하였다.

그림 4처럼 촉매 연소기 II에서 10mm 촉매를 3단으로 사용한 경우 그림 5와 같이 공간속도 150,000 hr⁻¹ 이하에서는 희박분위기에서도 높은 전환율을 보였고, 공간속도 180,000 hr⁻¹ 이상에서는 빠른 공간속도 때문에 당량비 0.4 이하의 희박분위기에서는 낮은 전환율을 보였다.

이는 당량비 0.4 이하의 희박분위기에서는 낮은 연료농도에 비해 너무 높은 공간속도 때문에 연소기 내에서 공기와 연료가스의 체류시간이 짧아져 미처 반응이 진행되지 못한 결과이다 공간속도 150,000

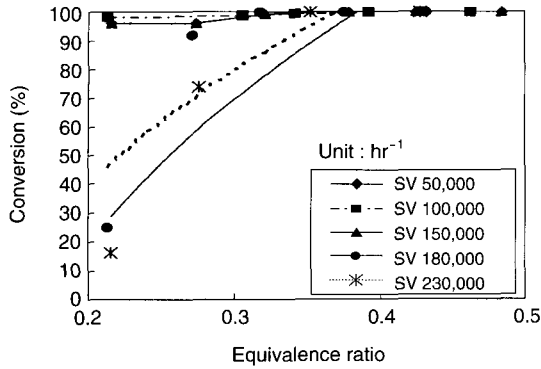


Fig. 3. Conversion rate versus equivalence ratio as a function of three-stage catalytic combustor.

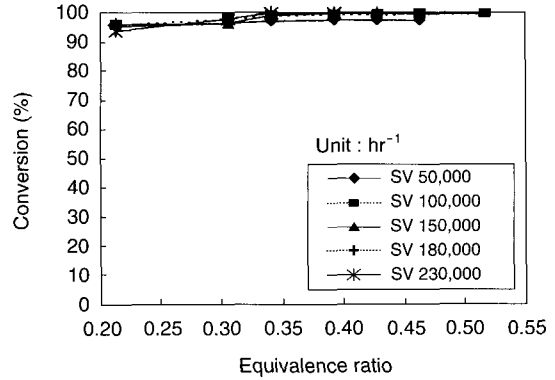


Fig. 5. Conversion rate versus equivalence ratio as a function of space velocity in the four-stage catalytic combustor.

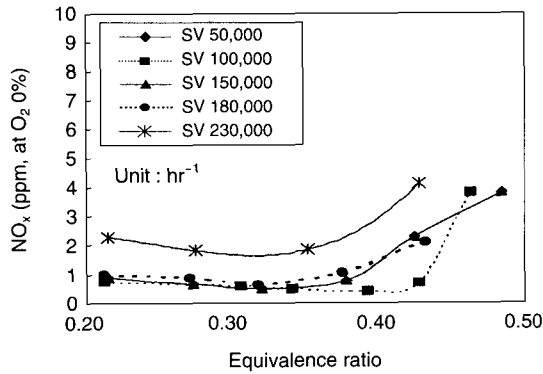


Fig. 4. NO_x concentration versus equivalence ratio as a function of space velocity for the three-stage catalytic combustor.

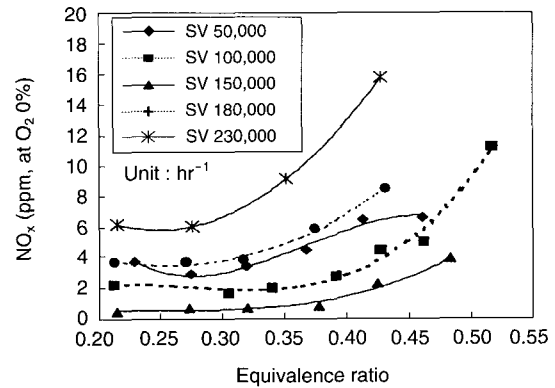


Fig. 6. NO_x concentration versus equivalence ratio as a function of space velocity for the four-stage catalytic combustor.

hr⁻¹과 180,000 hr⁻¹에서의 전환율을 비교해 보면 당량비 0.27에서는 20~30%, 당량비 0.21에서는 50~80%의 차이가 있었다.

그림 6에서 NO_x 배출특성을 살펴보면 다단 촉매를 사용할 시에는 촉매활성이 너무 활발하여 높은 전환율이 나타난 후에는 연소기내의 온도가 순간적으로 급상승하여 오히려 NO_x 배출농도가 높아졌다.

촉매 연소기 III에서 촉매를 4단으로 장착한 경우에는 그림 5에 나타난 것처럼 빠른 공간속도에서 공간속도의 영향을 받지 않고 높은 전환율을 보였다.

다단촉매 사용시에 공간속도에 따른 NO_x 발생량을 비교해보면, 공간속도가 높으면 발열량이 많기 때문에 단열조건이 형성되어 노 내의 온도가 상승한

다. 이러한 노 내의 온도상승으로 인해 NO_x가 생성될 수 있는 분위기가 조성되어 NO_x 배출이 증가한다고 해석될 수 있다.

4단 촉매사용시의 NO_x 발생을 살펴보면, 동일공간속도 230,000 hr⁻¹인 경우에 60~70%까지 증가하는 결과를 얻었는데, 이는 활성이 우수한 촉매를 4단으로 사용하므로 동일한 당량비에서도 전환율이 향상되고 이로 인해 온도가 급상승하여 높은 NO_x 발생 경향을 얻었다. 그러므로 4단 촉매 사용시에는 희박 분위기에서도 높은 전환율을 얻을 수 있었지만 연소기내의 온도상승으로 인해 NO_x 발생이 증가할 수도

있으므로 NO_x 저감측면에서는 3단 촉매가 4단 촉매 사용시보다는 더 경제적이었다.

3.2 2단 공기공급에 의한 영향

일반적으로 다단층으로 연료나 공기를 공급함으로써 연소기의 온도와 연소 생성물의 농도를 제어할 수 있다. 또한 촉매 층에서의 급격한 온도 상승에 의한 촉매의 손상 등을 방지할 목적으로 2차 공기를 주입하는 방법을 채택하기도 한다. 촉매 연소기 IV에서 촉매층 하단에 과잉공기의 양을 증가시킴으로

써 화염대에서 산소농도가 증가하고, 유량 증가로 인해 온도도 감소 되는 원리를 이용하여 2차 공기를 유입하는 실험을 수행하였다.

그림 7은 당량비를 0.42, 예열온도를 330°C로 고정시키고 2차 공기 유입량을 증가시키면서 2단 공기 공급에 따른 촉매층 출구 온도와 그 때의 NO_x의 농도를 살펴보았다. 2차 유입공기를 촉매층 하단에 유입시키면 노 내의 온도는 저하되지만, 산소농도의 증가로 질소가 산소와 결합할 수 있는 조건이 조성되어 NO_x 발생농도가 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

그림 8은 당량비를 0.32, 예열온도 350°C의 조건

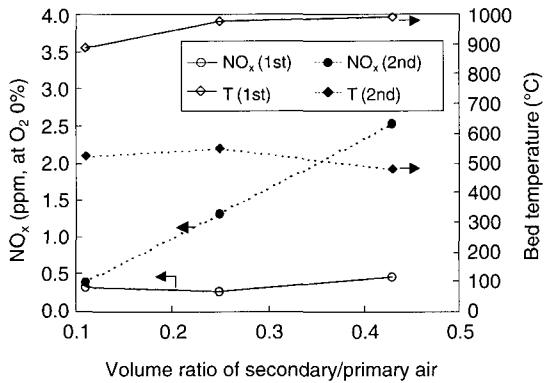


Fig. 7. The effects of the secondary air supply on NO_x emission and catalytic bed temperatures at an equivalence ratio of 0.42 and preheated temperature of 330°C.

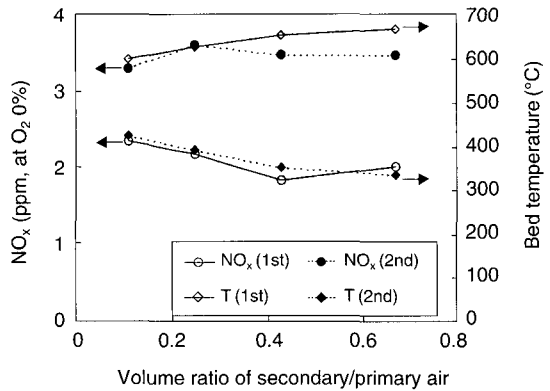


Fig. 9. The effects of the secondary air supply on NO_x emission and catalytic bed temperatures at an equivalence ratio of 0.21 and preheated temperature of 40°C.

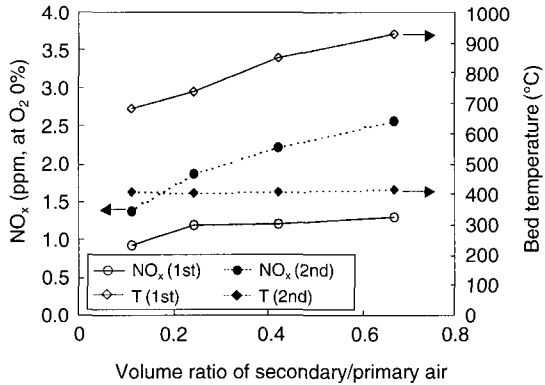


Fig. 8. The effects of the secondary air supply on NO_x emission and catalytic bed temperatures at an equivalence ratio of 0.32 and preheated temperature of 350°C.

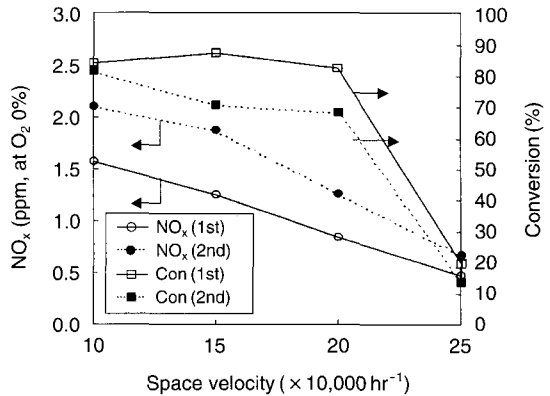


Fig. 10. The effects of the space velocity on NO_x emission and conversion at an equivalence ratio of 0.32 and preheated temperature of 35°C.

에서 촉매출구온도와 NO_x 발생을 분석한 결과로 2차 공기유입에 따라 NO_x 발생농도가 증가하였다.

그림 9는 당량비를 0.21, 예열온도 400°C의 조건에서 제1차 공기와 제2차 공기의 공급비율을 변경하면서 제1촉매와 제2촉매에서의 NO_x 농도와 촉매층 출구에서의 온도를 측정된 결과이다. 2차 촉매에서의 NO_x의 농도가 앞에서의 실험결과와 동일하게 더 높게 나타났다.

그림 8과 비교해 보면 당량비가 더 낮은 조건 즉, 과잉공기가 많을수록 높은 NO_x 배출농도를 얻을 수 있었다.

그림 10은 1차대 2차 공기비를 4:1, 당량비를 0.32, 예열온도를 350°C로 고정시키고 공간속도를 증가시키면서 2차 공기 공급시 공간속도가 NO_x 발생에 미치는 영향을 살펴보았다. 공간속도 200,000 hr⁻¹ 이상에서는 너무 빠른 공간속도 의해 1차 및 2차 촉매 공히 전환율이 저하되어 노 내의 온도도 저하되며, 이로 인해 NO_x 발생도 감소하는 경향을 보였다.

3.5 2단 연료공급에 의한 영향

촉매연소기 V에서의 실험시 2차 연료의 소량분산이 어려워 매우 제한적으로 밖에 실험을 수행하지 못하였다.

그림 11과 그림 12는 공간속도 150,000 hr⁻¹에서 2차 연료 주입시 1차 촉매층 출구온도와 2차 촉매층 출구온도의 변화를 당량비 별로 비교분석 한 결과이

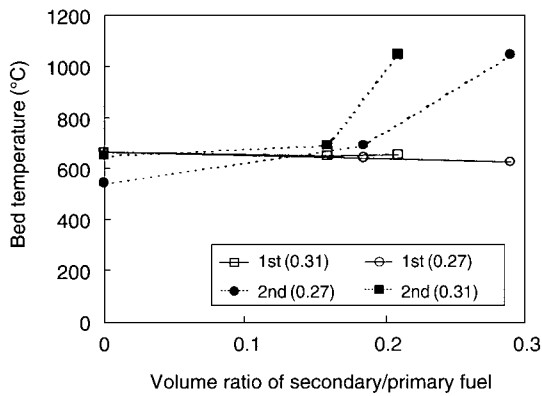


Fig. 11. The first and second catalytic bed temperatures versus the secondary/primary fuel ratio at apace velocity 150,000 hr⁻¹ and equivalence ratio of 0.31, 0.27.

다. 1차 촉매출구의 온도변화는 2차측 연료의 공급에 관계없이 비슷한 경향을 보였으나, 2차 촉매 출구의 온도변화는 당량비 0.31인 경우에는 2차 연료공급비가 0.16 이상에서, 당량비 0.27인 경우에는 0.18 이상에서 2차 촉매출구의 온도가 급격히 상승하였다. 당량비가 0.21과 0.11인 경우에는 2차 연료공급비가 각각 0.4, 0.5 이상에서 2차 촉매층 출구에서의 온도가 급격히 상승하여 당량비가 높을수록 적은 2

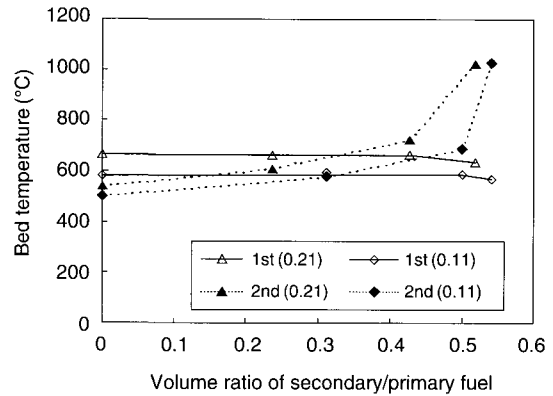


Fig. 12. The first and second catalytic bed temperature versus the secondary/primary fuel ratio at space velocity 150,000 hr⁻¹ and equivalence ratio of 0.21, 0.11.

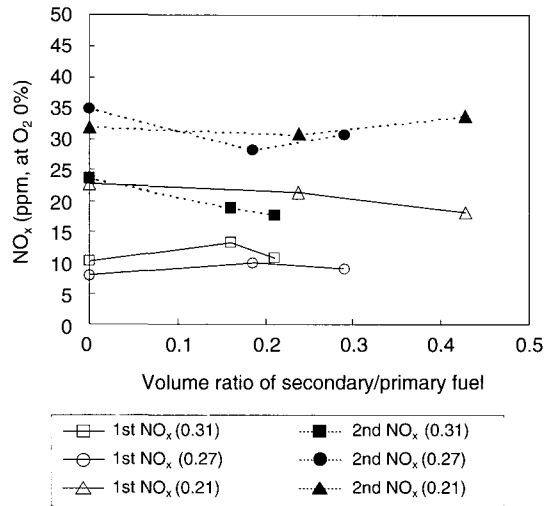


Fig. 13. The first and second NO_x emission versus the secondary/primary fuel ratio at apace velocity of 150,000 hr⁻¹.

차 연료의 공급에도 온도변화가 크게 나타났다.

그림 13은 동일 공간속도에서 1차 축의 연료를 일정하게 공급하면서 2차축 연료 주입량을 변경하여 1차 축매 출구 및 2차 축매 출구축의 NO_x 농도 분포이다.

2차 연료를 회박연소 한계내에서 분사하는 경우에도 국지적인 가연혼합 화염이 형성되어 미세한 화염연소가 이루어짐으로서 오히려 Thermal NO_x가 발생할 기회를 제공하여 NO_x 발생농도가 1차축 축매 출구보다 높게 발생하였다.

4. 결 론

메탄이 주성분인 LNG를 연료로 사용하여 축매 연소기내에서 예열온도, 당량비, 공간속도등을 변화시키면서 Hybrid 연소법, 다단 연소법을 통해 NO_x 배출을 저감시킬 수 있는 연소개선을 위한 기초실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 축매를 다단으로 설치하고 실험을 수행한 결과 4단 축매 설치시에는 빠른 공간속도에서도 높은 전환율을 나타내었다. 공간속도에 따른 NO_x 발생을 비교해보면 공간속도가 높으면 열 발생량이 많기 때문에 단열조건이 형성되어 높은 NO_x 배출을 보였다.

2) 축매하단에 2차 공기를 공급한 결과 2차 공기의 유입량이 증가할수록 차가운 외부공기의 유입으로 노 내의 온도는 저하되지만, 산소농도의 증가로 0%로 보정한 NO_x 발생농도는 증가하였다.

3) 축매하단에 2차 연료를 분사하는 Hybrid 축매 연소법에 의한 연소실험에서 2차 축매출구의 온도 변화는 급격히 높아졌다. 이것은 2차 연료를 회박연소 한계 내에서 분사하는 경우에도 국지적인 가연혼합이 형성되어 화염연소가 이루어짐으로써 Thermal NO_x가 발생할 기회를 제공하여 NO_x 발생농도가 1차축 축매 출구축보다 높게 발생하였다.

참 고 문 헌

강성규, 송광섭, 서용석(1998) 중·고온 축매연소용 축매 및 연소기 개발에 관한 최종보고서, 산업자원부, pp. 52-98.

문승현, 유인수, 강성규(1992) 축매연소 기술현황, 에너지 R&D, 14(3), 2-6.

백영순, 강성규, 박상순(1997) 산업용 천연가스 축매연소기 개발연구, 한국가스공사 연구개발원, pp. 12-70.

신규식, 최익수(1987) 질소산화물저감 대책연구, 한국동력자원연구소, pp. 5-291.

서용석(2000) 축매 연소기의 회박 예혼합기 연소특성, 한국과학기술원박사학위논문, pp. 1-28.

이보영(2001) 축매 연소기에서 NO_x 저감책에 관한 연구, 호서대학교석사학위논문.

전영남(1996) 연소로에서 NO배출 및 연소특성에 대한 수치해석적 연구, 한국대기보전학회지, 12(5), 576-587.

전학제(1998) 축매개론, 한림원, pp. 146-191.

홍성수, 박종원, 정덕영(1998) 질소산화물이 축매반응에 의한 저감기술에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(1), 26-38.

C. David Cooper, and F.C Alley(1994) Air Pollution Control, Waveland press, Inc., pp. 45-511.

D. Klvana, and J. Chauki(1996) Catalytic Combustion: New Catalysts for new Technologies, Gas Technology Research Group.

EPA(1999) Compilation of air pollutant emission factors AP-42, Fifth addition, Volume I: stationary point and area sources.

H. Arai, K. Eguchi, and M. Machida(1990) Development of Catalytic Combustion for Emission Control of Nitrogen Oxides, Proceedings of Fukuoka International Symposium, 90, 227-236.

Lavoie, G.A., J.B. Heywood, and J.C. Keck(1970) Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines, Combust. Sci. Tech., 313.

Norman Chigier(1981) Energy, Combustion and Environment, Mc.Graw Hill, pp. 326-340.

Rah, S.C.(1985) Combustion of Liquid Fuels and Pollutant Formation, Korean J. Ch.E., 1.

Robert A. Meyers(1998) Environmental Analysis and Remediation (I), John wiley & Sons, Inc., pp. 129-244.

Song, Y.H., D.W. Blair, V.J. Siminski, and W. Bartok(1981) Conversion of Fixed Nitrogen to N₂ in Rich Combustion Generated Pollution, 18th. Symp. (Int.) on Combust., 53.

Stephen R. Turns(1999) An Introduction to Combustion, McGraw-Hill Co.