

고온, 희박공기 연소에 관한 실험적 연구

정 대현*, 양 제복*, 노 동순*, 김 원배*

An Experimental Study on High Temperature and Low Oxygen Air Combustion

D. H. Chung, J. B. Yang, D. S. Noh, W. B. Kim

Key words : high temperature air combustion, diluted air, blue-green flame, ICCD camera

ABSTRACT

High temperature preheated and diluted air combustion has been developed as the technology to realize higher thermal efficiency. In this type of combustion, there are many interesting phenomena which cannot be observed in room temperature air combustion.

The characteristics of the combustion, investigated using a 3500 kcal/h LPG fired test facility, are described. The flame is demonstrated to have a blue and green in color and has a large volume. As the preheated air temperature increased up to 1000 °C, the NO_x emission increased exponentially over a few hundred ppm with 11% O₂ correction. But, it drastically reduced about 20ppm when the air was diluted from 21% O₂ to 5% O₂.

1. 서론

에너지 다소비 열설비인 공업로는 우리나라 전체 에너지 사용량의 약 15% 이상을 차지하고 있으며 공업화된 지역을 중심으로 약 5,000기 이상이 설치되어 있다. 이러한 공업로의 효율적 이용을 위한 노력이 있었으나 유가에 크게 영향을 받아 국내의 경우 큰 성과를 거두지 못하였으며 국외적으로는 1992년 6월에 Rio(Brazil)에서 지구환경 summit가 개최되었고, 여기서 CO₂ 삭감(에너지절약)에 의한 지구환경 보호를 위한 대형 project가

기획되기도 하였다.

본 연구의 목적은 고효율 저공해 연소로의 개발을 위하여 종래에는 불가능하다고 생각된 1,000°C 이상의 고온 공기를 이용한 연소기술^(1,2,3)에 기반을 둔 것이다. 산소농도가 희박하고 공기온도가 높은 조건에서 생기는 연소에 대해서 지금까지 거의 알려지지 않았다. 연소용공기의 산소농도는 희석됨에 따라 안정성은 저하되지만 공기온도가 높아지면 안정성은 증가한다고 알려져있다⁽⁴⁾. 산소농도가 희석되어도 연소용 공기온도를 충분히 높인다면 안정연소가 가능하다고 생각되어 산소농도의 희석과 연소용공기의 고온화가 잘 조합된 연소를 "고온공기연소"라고 정의하고 있으며, 이를 이용한 새로운 연소기술 개발에 많은 연구가 진행되고있다.

* 정회원 (한국에너지 기술연구소)

고온공기와 희박공기를 이용한 연소는 질소산화물의 감소 및 이산화탄소 발생량을 감소^(3,4)시키고 고온의 화염에서는 C₂ 라디칼이 증가하여 blue-green flame의 성향^(5,8)을 갖는다고 알려져 있다. 과거에도 저 발열량 연료 등을 연소시키는 초과엔탈피 연소개념이 있었지만 공기의 예열온도가 1,300 K를 넘으면 연료와 공기의 확산이 빠르게 일어나는데 이와 같은 고온의 연소 mechanism의 기초적인 자료에 대해서 알려진 것은 별로 없으며 특히 고온공기 연소시 연소소음의 저하 등 이론적으로 설명이 불가능한 사항들이 존재한다. 따라서 본 연구를 통해 고온공기, 저산소농도 연소의 개념을 실제의 연소시스템에 적용하기 위한 준비로 고온공기연소의 특성을 파악하고 그 현상을 규명하는 것이 본 연구의 목표이다.

2. 이론적 배경

저 산소농도의 고온공기를 연소용 공기로 이용할 경우 예열공기량, 예열공기 열량, 희석가스량, 희석가스 열량의 영향을 고려한 연소온도(T_b)는 식(1)과 같다. 여기서 희석가스란 연소용 공기중의 산소농도를 감소시키기 위하여 공기에 질소를 포함시킨 것을 나타낸다. 식 (1)의 의미는 예열공기온도의 상승에 따라 연소반응에 유입되는 희석가스량을 일정 비율로 증가한다면 연소최고온도를 일정하게 유지할 수 있다는 것이다. 이것을 연료와 산화제의 반응속도 측면에서 본다면 식 (2)와 같이 공기온도가 증가하여도 이것에 준하는 양의 희석가스를 공급함으로써 반응속도를 일정하게 유지 가능하다는 것이다. 즉, 고온 희박공기를 이용한 연소는 연소최고온도를 제어하는데 있어 매우 폭넓은 융통성이 있다고 할 수 있다.

실제의 연소장에서 연소공기의 고속분사기류에 의해 로내가스 재순환이 일어나고, 재순환된 로내가

$$T_b = \frac{H_u + G_w h_{uo} + G_D h_{DO}}{(G_w + G_D) \cdot C_p} + T_o \quad \dots (1)$$

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \cdot [F]^m [O]^n \left(\frac{1}{1+D}\right)^{m+n} \dots (2)$$

여기서 *m, n* : 반응계수 *γ* : 반응속도
H_u : 연료의 엔탈피 *h_{uo}* : 예열공기 열량
G_w : 예열공기량 *G_D* : 희석가스량
h_{DO} : 희석가스 열량 *D* : 산소농도
O : 산화제 *F* : 연료

스는 연소용 공기와 합류되어 저 산소농도로 연소가 발생되는데 이때 형성된 저 산소농도의 유동장이 로내 온도를 균질화시키기 때문에 고온공기를 사용할 경우에 문제시 되는 국부 고온영역의 형성을 막을 수 있다. 또한 연소가스 재순환이 강화되고, 연료가 분산됨에 따라 형성된 고온, 저산소장에서의 연소는 온도 potential은 높지만 화염 체적이 크고 온도구배와 농도구배가 적어 로내온도의 분포를 균일화할 수 있어 단위 전열면적당의 전열능력이 증가하게 된다. 이에따라 열설비의 소형화도 가능하게 된다.

3. 실험장치 및 구성

Fig. 1 은 고온공기의 연소특성을 알아보기 위하여 사용한 실험장치의 개략도 이다. 최고 1,100°C의 고온공기를 발생시키기 위한 전기로 부분과 연소실험을 하기 위한 연소 실험장치 부분을 하나의 몸체로 이루어지도록 설계하였다.

전기로의 형상은 제작이 간단하며 칸탈선의 시공이 용이하도록 단면은 원형이 되게 하였다. 로의 제작은 외경 500mm의 원통에 두께 200mm의 단열재를 벽면과 밑면에 넣은후 소선 굵기 2.2mm, 스프링 굵기 10mm의 칸탈선을 Fiber Cast로 반매몰 되게 시공하였다. 처음 찰흙처럼 물렁물렁한 Fiber Cast는 칸탈선에 전기를 통하여 승온 시키면 딱딱하게 굳어져 열선이 떨어지는 것을 막아준다. 칸탈선은 1개의 용량이 5kW인 것을 2개를 병렬로 연결하여 로의 용량이 10kW가 되도록 하였고 TPR Controller를 통해 PID 자동제어가 이루어지도록 하였다. 전기로의 상단부는 연소장치를 연결할 수 있도록 내경 100mm의 원통을 부착하고 투입공기의 누출이 없도록 플랜지 형으로 Bolt를 체결한 후 열풍온도를 측정할 수 있는 측정구를

2곳에 설치하였다. 또한 실험 중 화염의 온도를 측정하고 주위의 공기가 화염에 영향을 미치지 않기 위해 화염이 형성되는 주변에는 Chamber를 설치하였다. Chamber의 형상 및 크기는 사각형으로 단면이 180mm×180mm, 높이 300 mm로 하였고 양쪽의 2면에는 화염관찰 및 광학적 사진촬영을 위해 100mm×250mm의 경화유리를 끼워 넣는 구조로 하였다. 배기가스분석을 위해서는 Chamber의 상단에 끝을 50mm×50mm로 줄인 커버를 연결하고 중간에 가스분석 프러그 삽입구멍을 뚫어 측정을 할 수 있도록 하였다. 발생된 열풍온도가 고온이고 전기로 위에 연소 실험장치가 부착되어 풍량 계측이 불가능하여 Blower에서 나오는 공기량을 유량계와 오리피스를 통해 계측한 후 계측된 공기가 전기로에 유입되도록 하였다. Blower의 용량은 10 m³/min, 풍압은 100mmAq 이고 220V 단상의 Blower를 사용하였다. 가스와 연소용 공기의 혼합방식은 가스와 공기의 분출구조에 따라 Fig.2의 (a), (b) 2가지로 하였으며 이때 노즐의 형상은 (c)이다. 따라서 화염은 부분예혼합과 확산화염이 되고 공기 유입구 쪽에 노즐의 형상을 테이퍼지게 하여 보염이 이루어지게 하였다.

실험 내용으로는 예열 공기의 온도 및 산소 농도에 따른 연소특성을 알아보기 위해 연소용 공기의 온도를 상온에서부터 200℃, 400℃, 600℃, 800℃ 및 1,000℃로 변화시키며 그때의 화염 특성을 사진 촬영하고 배기가스분석을 통하여 연소특성을 알아보았다. 연소용 연료는 LPG(프로판)를 사용하였고 유량은 1.5 ~ 2.5 l/min, 공급압력은 200mmAq 이다. 예열 공기의 온도측정은 연소장치의 하단과 전기로의 상단 2곳에서 하였는데 그 오차는 1% 이내이었다. 또한 연소용 공기의 산소 농도에 따른 특성실험을 파악하기 위해 연소용 공기에 질소를 혼합하여 공기 중 산소농도를 21%, 15%, 10% 및 5%로 변화시키며 사진 촬영하고 동시에 배기가스 분석을 통하여 연소특성을 알아보았다. 공기중 산소농도의 조절방법은 공기유량계 및 오리피스의 앞부분에 질소 공급관을 설치하고 유량을 일정하게 유지시키며 질소를 공급하여 예열공기의 산소농도를 조절하였다. 질소의 공급은 보배에서 압력조절기를 거쳐 Matheson 유량계를 통해 질소량을 확인

하고 전기로 입구부근에서 가스분석 하여 정확한 산소농도를 조정하였다.

한편 화염지역에 분포하여 화염구조의 파악에 중요한 인자로 작용하는 중간생성물의 측정은 기존의 probe 삽입과 같은 방법으로는 측정이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 광학적 증폭기(intensifier)가 있는 ICCD(Intensified Charged-Coupled Device) 카메라를 이용한 계측방법을 이용하였다. 이것은 탄화수소 계열의 연료들의 연소에서는 그 중간생성물로 반응지역에 존재하는 OH radical 및 연료가 분해되는 지역에 존재하는 C₂ 및 CH radical 들의 고유 파장대를 갖는 자발형광을 계측하여 화염대의 구조를 파악하는 것이다. 이 radical들이 내는 형광을 포착하기 위하여 구성한 시스템은 Fig. 3 과 같다. 각각의 radical이 내는 파장의 형광만을 통과시키기 위하여 사용된 필터들은 Andover 사의 것으로 그 사양은 다음과 같다.

- C₂ 투과용 필터 : $\lambda_p = 516.6 \text{ nm}$, Bandwidth = 8.9 nm
- CH 투과용 필터 : $\lambda_p = 431.2 \text{ nm}$, Bandwidth = 10.3 nm
- OH 투과용 필터 : $\lambda_p = 310.7 \text{ nm}$, Bandwidth = 10.4 nm

이 필터들을 통과한 형광은 자외선이 투과되는 UV 렌즈를 거쳐 intensifier에서 증폭되어 CCD 카메라를 통해 P/C 모니터에 그 영상이 기록된다. ICCD 카메라는 브이텍의 모델 MXV를 이용하였으며 Gain은 10⁷ 까지 가능하다. 본 연구에서는 실험장치의 창이 경화유리로 되어 OH 라디칼의 측정 시 자외영역의 형광을 통과시키지 못하는 관계로 실험장치의 창문을 열고 촬영하여, 외부공기의 유입의 영향을 가장 적게 받는 화염의 뿌리부분 즉, 버너 출구부의 화염을 중심으로 하였다.

3. 실험결과 및 분석

노즐형상의 변화에 대한 배기가스특성 변화와 연소특성을 검토하였다. 고온공기의 분출속도를 변화시키기 위한 방법으로 노즐 직경을 변화시킴으

로써 공기 속도를 변화하였는데, 노즐출구부의 공기유속을 상온에서 1.2 m/s 이상으로 한 경우, 예열공기온도가 1000°C로 변함에 따라 실제 유속은 5m/s 이상이 되어 화염이 불안정하고 연소가 잘 이루어지지 않았으며, 상온에서 유속이 0.5 m/s 이하인 경우 연소는 안정적으로 이루어지나 유속이 늦어져 화염이 노즐 부근에서만 형성되어 화염의 형상이 잘 이루어지지 않아 대부분의 실험은 상온 기준 공기유속 1m/s 부근에서만 행하였다. 이는 예열공기온도 1000°C를 기준으로 가스분출속도와 공기분출속도의 비가 2.4 인 경우로 실험은 연소용공기와 가스의 분출구조에 따라 case (a)(Fig. 2 (a)) 및 case (b)(Fig. 2 (b)) 2가지에 대해서 수행하였다. 이때 실험조건은 가스량 1.8 l/min 이고 산소농도 21%를 기준으로 연료와 유입공기의 이론적인 비율인 당량비는 0.33 이다. Fig. 4 에 case (a)에 대해 NOx 와 CO의 특성을 나타내고있다. 유입되는 산소의 농도가 21%인 경우 CO는 약 400°C를 기준으로 감소하여 CO가 감소하다가 증가하는 경향을 보인다. 이는 온도증가에 따라 CO의 산화반응이 촉진되어 400°C 까지 CO가 감소하다가 온도증가에 따른 반응속도의 증가에 따라 반응시간이 감소하여 CO가 증가하는데 기인한다. 한편 NOx 발생량은 산소농도 11%를 기준으로 나타내었는데 유입되는 산소의 농도가 21%에서, 예열공기온도가 30°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C로 변화함에 따라 30ppm에서 최대 850ppm 까지 증가하는 경향을 보인다. 이는 온도증가에 따라 Thermal NOx 가 증가하기 때문이다. 그러나 예열공기온도 1000°C에서 유입되는 산소의 농도를 21%에서 5%로 감소시킴에 따라 NOx 배출농도는 850ppm에서 20ppm으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 Z'eldovich mechanism로부터 설명이 가능하다. 즉, Thermal NOx의 생성율은 산소농도와 화염온도에 의존하는데 산소농도가 감소됨에 따라 화염온도가 감소하고 화염온도의 감소는 NOx 생성율을 더욱 줄어든다.

결국 예열공기온도를 30°C에서 1000°C로 증가시켜 화염온도를 상승시켜도 유입되는 연소용 산소농도를 감소시킴에 따라 CO와 NOx 등의 공해배출물이 오히려 상온인 경우에 비하여 감소하는 특성을 나

타낸다. 유동의 형태가 case(a)에서 case(b)로 바뀌면 NOx와 CO의 값은 예열공기온도와 산소농도의 변화에 따른 경향은 유사하나 그 값은 약 30%, 50%의 감소특성을 보인다. 이는 혼합특성에 관한 문제로 case (b)의 경우 혼합이 더욱 양호하게 이루어진 것으로 사료된다.

한편 ICCD camera를 이용하여 청색발광원인 CH radical, 녹색발광원인 C₂ radical과 반응지역을 나타내는 OH radical을 예열공기 온도변화 30°C~1000°C, 산소 농도의 변화는 21%~5%에서 정성적으로 측정하였다.

<사진 1>에 산소농도 21%인 경우 예열공기의 온도변화에 따라 C₂ 와 CH radical의 농도분포를 비교하여 나타내었다. 이 사진은 gray level index의 적당한 범위를 잡아 화염의 발광강도에 따라 흰색, 빨강, 파랑, 녹색, 하늘색 및 진노랑의 색상을 입력하여 색으로 표현하였다. 일반적으로 CH 및 C₂ radical의 분포는 우리가 육안으로 보이는 화염의 강도와 거의 유사하다. 사진결과 예열공기온도의 증가에 따라 CH radical과 C₂ radical의 발광강도는 강해지고 발생지역도 넓어짐을 알 수 있다.

<사진 2>에 예열공기온도 1000°C에서 산소의 농도를 21%, 10% 및 5%로 변화시키며 C₂ 와 CH radical의 분포를 비교하여 나타내었다. 산소농도 21%인 경우 C₂ radical의 분포와 CH radical의 강도가 유사하게 나타나고 있으나 산소농도가 10%와 5%로 감소하는 경우 C₂ radical의 강도가 CH radical에 비하여 상대적으로 강하게 나타나고 있다. 또한 고온에서 산소의 농도가 희석될수록 C₂ radical 과 CH radical이 연료 노즐에서 떨어진 하류부에서 많이 발생하는 특징이 나타났다. 결국, LPG 연료의 경우 희석공기의 예열온도 증가에 따라 화염은 C₂ radical의 특징인 녹색 경향을 띠게 되고 산소농도가 낮아지면 그 증가비율은 커지게 되며 화염은 하류부에서 안정적으로 발생함을 알 수 있다.

전체적으로 보면 CH 및 C₂ radical의 분포는 산소농도가 21%의 경우, 예열공기온도에 무관하게 화염의 상류 즉, 버너출구부분의 전 영역에서 강하게 분포하고 그 강도와 영역은 예열공기 온도의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러나 산소의 농

도가 희박해질수록 화염의 상류부분에서 CH 및 C₂ radical의 분포가 줄어들고 하류로 이동하는데 이때 C₂ radical이 특징인 green flame의 성향을 보인다.

이는 산소의 농도가 낮아질수록 반응율이 감소하여 반응이 지연되고 반응두께도 두꺼워지는데 기인한다. 즉, 반응대에 주로 분포하는 것으로 알려져 있는 CH 및 C₂ radical은 산소농도가 희박해질수록 반응영역이 하류로 이동함을 잘 보여주고 있다.

<사진 3>에 OH radical을 측정하여 그 특성을 나타내고 있다. OH radical은 주로 고온 영역에서 발생한다. 측정결과 예열공기온도의 증가와 산소농도의 감소에 따라 화염용적이 증가하고 OH 반응지역도 뚜렷하게 변화되고 있다. 특히, 산소농도 21%인 경우 예열공기온도의 증가에 따라 유동속도와 반응이 빨라져 예열공기온도 1000℃인 경우 반응면이 유선을 따라서 강하고 넓은 지역에서 발생하나 산소농도가 감소할수록 반응영역이 감소하는 경향을 보인다.

OH radical 분포강도의 경우 예열공기온도의 증가에 따라 그 강도는 증가하나 산소농도의 감소에 따라 현저하게 감소하는 특성을 보인다. 이는 OH radical이 반응지역에서 발생하기 때문에 예열공기온도의 증가에 따라 열발생율(heat release rate)이 증가하여 반응이 활발해져 연료가 노즐부에서 토출된 후 반응이 바로 강하게 이루어지나 산소농도가 감소하면 반응물(reactant)의 감소로 인하여 반응이 축소되고 지연됨에 기인한다. 따라서 OH radical의 측정을 통해서 반응지역과 비반응지역의 구분이 가능하고 반응강도를 예측할 수 있어 버너설계에 상당한 도움이 되리라 사료된다.

4. 결론

에너지 절약과 공해배출물 저감을 목표로 하여 고온 및 희박공기 연소에 관한 연구를 실험적으로 수행하였다. 실험결과 화염은 고온의 예열공기와 희박한 산소농도의 상태에서 C₂ radical의 특징인 청록색의 화염 색깔을 나타냈으며, 화염의 체적이 증가하는 특징을 OH radical의 분포를 통하여 확인하였다. 또한 산소농도가 21%로 일정한 상태에서 예열공기의 온도를 1000℃로 증가시키면

Thermal NO_x는 약 850 ppm을 나타내었으나 산소농도를 5%로 감소시킴에 따라 그 양이 약 20 ppm으로 감소하여 향후 이 기술이 실용화한다면 공해배출물 감소에 상당한 효과가 있으리라 사료된다.

참고 문헌

1. Toshiaki Hasegawa and Ryoichi Tanaka, "Combustion with High Temperature Low Oxygen Air in Regenerative Burners", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p290-p293, Japan.
2. NEDO, New Industrial furnaces of Higher thermal Efficiency Project Report, IV(1996).
3. M. Katsuki and K. Ebisui, "Possibility of Low Nitric Oxides Emission From Regenerative Combustion Systems Using Highly Preheated Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p294-p297, Japan.
4. T. Fujimori D. Riechelmann and J. Sato, "Experimental Study of NO_x Reduction by Lifted Turbulent Jet Flame in Highly Preheated Flows", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p298-p301, Japan.
5. Ken Kishimoto, "Observational Study of Chemiluminescence from Flames with Preheated and Low Oxygen Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p468-p475, Japan.
6. Jun'ichi Sato, "Combustion in High Temperature Air", The First Asia-Pacific Conference on Combustion(1997), p286-p289, Japan.
7. Tanaka, R, Kishimoto, K. and Hasegawa, Combustion Sci. Technol. (Japanese ed.), Vol.2, (1994), p.257.
8. 省エネルギー : 高温空気燃焼特集, Vol.48, No.10 (1996). p18-p52.

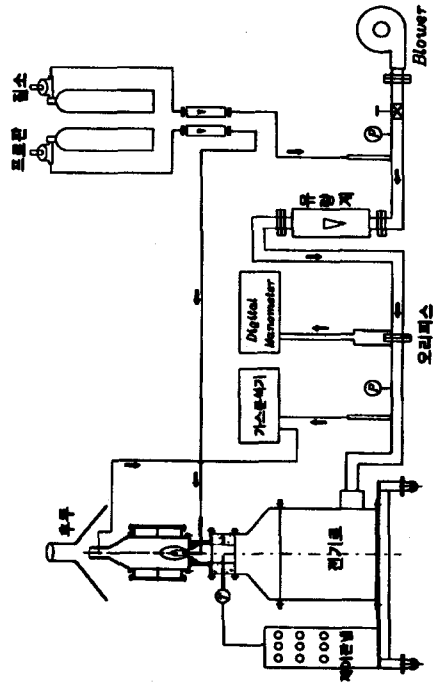


Fig.1 연소실험장치의 형상

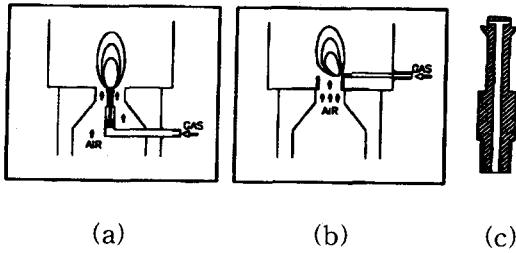


Fig. 2 실험에 사용된 가스노즐의 형상

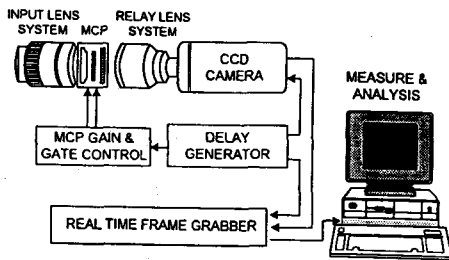


Fig. 3 ICCD camera 의 구성도

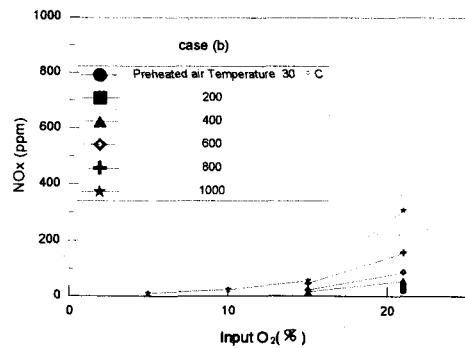
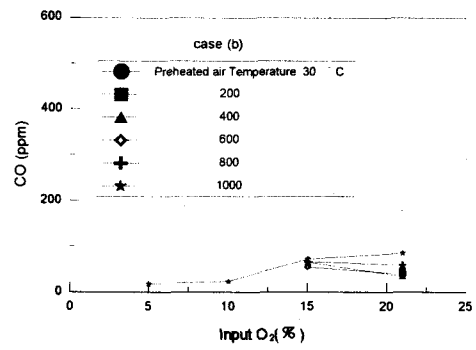
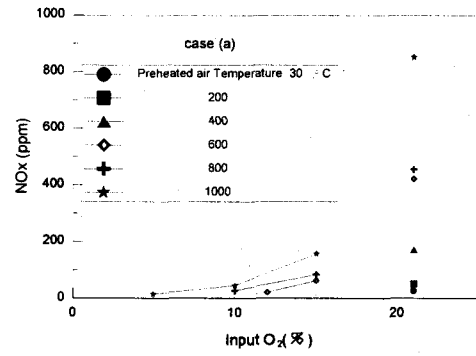
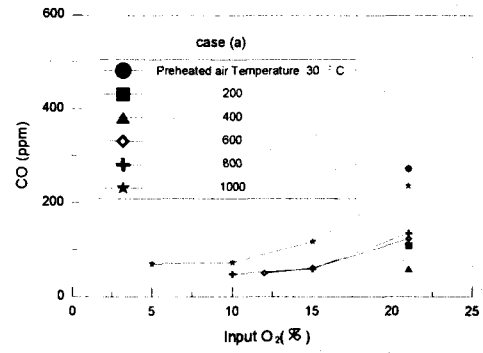
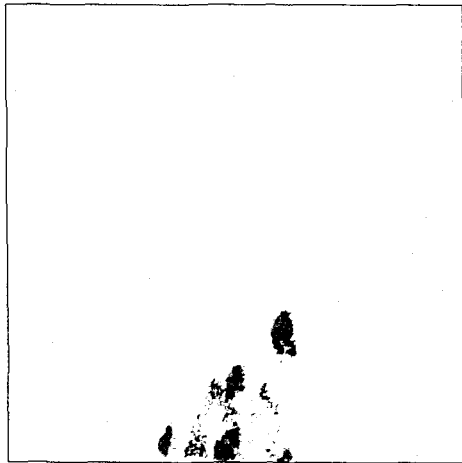
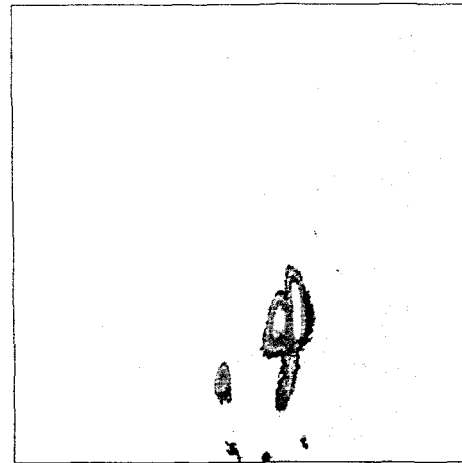


Fig.4 노즐변화에 따른 NOx 및 CO 배출특성



30°C , O₂=21% , CH Radical



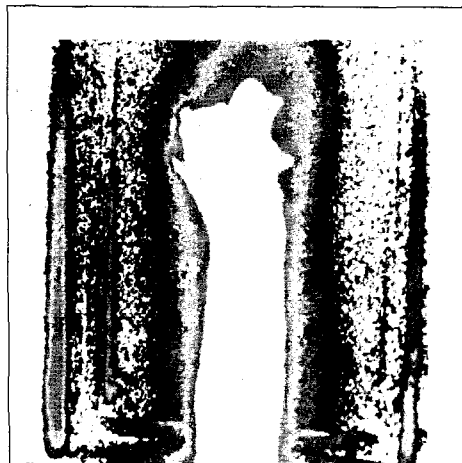
30°C , O₂=21% , C₂ Radical



400°C , O₂=21% , CH Radical



400°C , O₂=21% , C₂ Radical

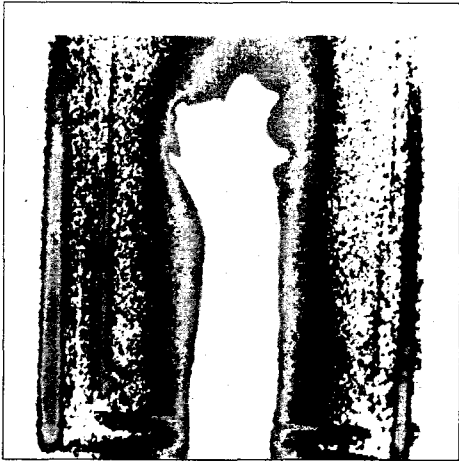
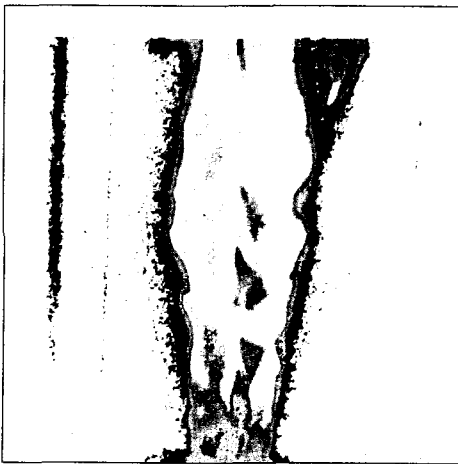
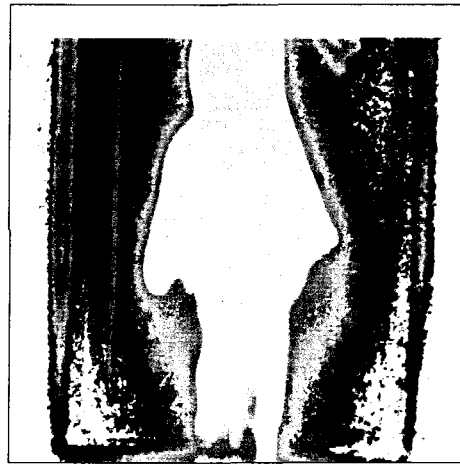
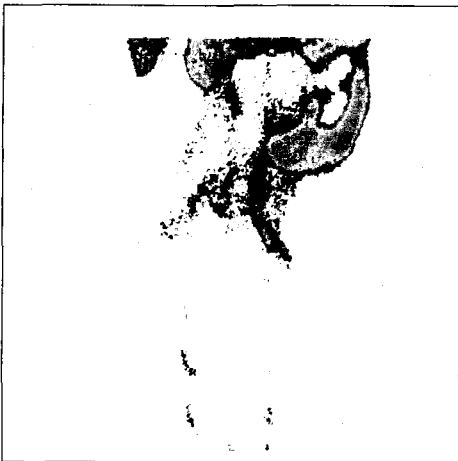
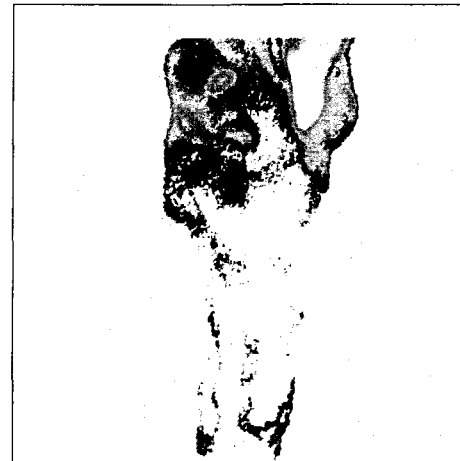


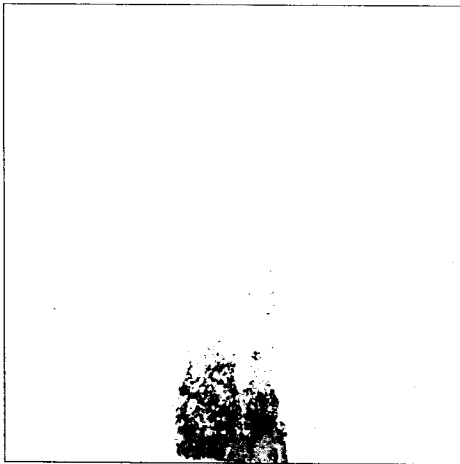
1000°C , O₂=21% , CH Radical



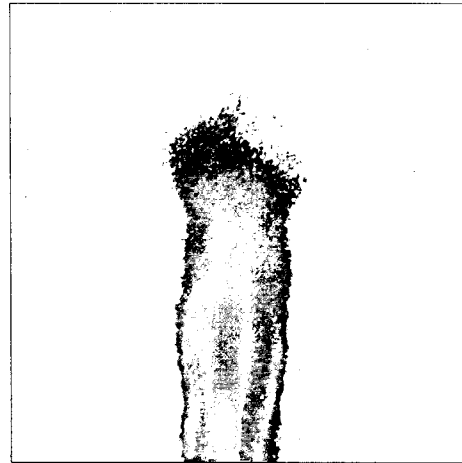
1000°C , O₂=21% , C₂ Radical

<사진 1> CH 및 C₂ Radical 의 특성

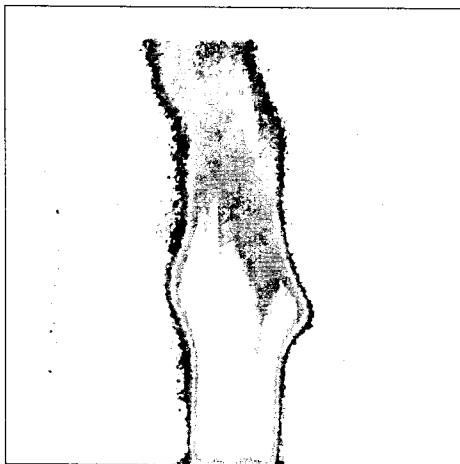
1000°C , O₂=21% , CH Radical1000°C , O₂=21% , C₂ Radical1000°C , O₂=10% , CH Radical1000°C , O₂=10% , C₂ Radical1000°C , O₂=5% , CH Radical1000°C , O₂=5% , C₂ Radical<사진 2> CH 및 C₂ Radical 의 특성



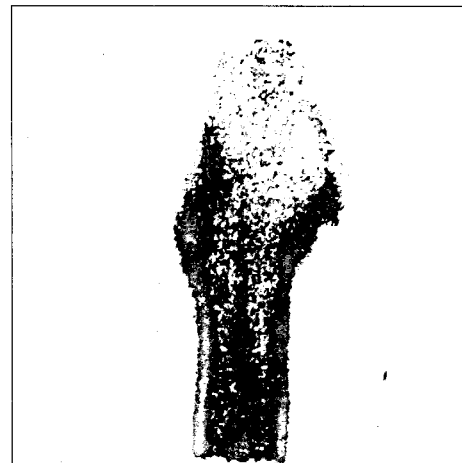
30°C , O₂=21% , OH Radical



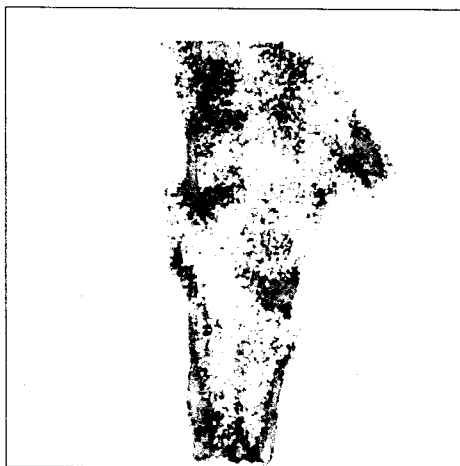
400°C , O₂=21% , OH Radical



1000°C , O₂=21% , OH Radical



1000°C , O₂=10% , OH Radical



1000°C , O₂=5% , OH Radical

<사진 3> OH Radical 의 특성