

이산화탄소가 수소 산소부화 화염의 열전달에 미치는 영향

이창엽* · 최준원* · 백승욱†

(2004년 3월 3일 접수, 2004년 6월 17일 심사완료)

Effects of CO₂ on Heat Transfer from Oxygen-Enriched Hydrogen Flame

Chang Yeop Lee, Joon Won Choi and Seung Wook Baek

Key Words : Hydrogen(수소), Oxygen-Enriched(산소부화), CO₂(이산화탄소), Heat Transfer(열전달), R-adiation(복사), Convection(대류), Heat Flux Meter(열유속계), Diffusion Flame(확산화염)

Abstract

An experimental study has been conducted to evaluate the effects of CO₂ on heat transfer from oxygen-enriched hydrogen flame. Experiments were performed on flames stabilized by a co-flow swirl burner, which was mounted on top of the furnace. Five different oxidizer compositions were prepared by replacing N₂ with CO₂. In a steady state, the total as well as radiative heat flux from the flame to the wall of furnace have been measured using a heat flux meter. Temperature distribution in furnace also has been measured and compared. By increasing CO₂ proportion in the oxidizer, the convection played a more significant role rather than radiation. Overall temperature in the furnace was seen to be decreased, while the total heat flux has increased.

기호설명

- Ω : 산소부화비율(Oxygen Enrichment Ratio)
- Φ : 당량비(Equivalence Ratio)
- D : 선회기의 내부 직경.
- d_h : 선회기 허브의 직경.
- S : 선회수 (Swirl Number)
- ⊙ : 선회기 vane 의 각도

1. 서론

산업사회가 발달하고 환경에 대한 인류의 관심이 고조되면서 에너지절약과 공해절감을 위해 대체에너지 및 고효율·저공해 연소방식의 도입이 필요하게 되었다. 이에 청정에너지로서 수소에 대한 관심이 증대되었으며 고효율의 연소방식으로 산소부화연소가 고려되고 있다.

수소는 그 사용가능성이 크고 발열량이 높으면서 점화가 쉬운점 등 공학적으로 매우 우수한 성질을 가지고 있는 연료이다.

그러나 생산이나 보관 및 사용에 따른 고비용과 위험성 때문에 그 동안 에너지로서 사용되지 못하였다. 기술의 발달로 인해 이러한 문제점이 해결되면서, 수소가 가진 연료로서의 가능성은 더욱 커지게 되어 그 사용 가능성이 증대되었다

연료로서 수소의 가능성은 다양하게 연구되었다. Melvin⁽¹⁾은 수소의 확산화염에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며 Suzuki et al.⁽²⁾은 수소의 확산화염에 대한 스윙(swirl)의 효과를 실험적으로 연구하였다. Sano et al.⁽³⁾은 수소 연소기에서의 NO_x 제어 및 역화현상(Flashback) 억제를 위한 실험을 하였다.

산소부화연소는 산화제 중에 산소의 비율을 증가시켜서 연소성능을 향상시키는 방법이다. 연료-공기 연소에 비해서 화염의 온도는 상승하며 산화제 중의 회석제 양이 감소되어 열전달 효율이 높아지는 특징을 가지고 있다. Baukal 과 Gebhart⁽⁴⁾는 천연가스(LNG)에서의 산소부화연소 시 복사열전달에 관한 실험을 수행하였다.

CO₂ 는 지구온난화의 주범으로 규제대상으로

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공
E-mail : swbaek@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3714 FAX : (042)869-3710

정해져 있으나, 복사열전달에 참여하는 대표적인 기체이다. 화석연료 연소의 경우 연소가스의 이산화탄소 비율을 높여 이를 재순환시키는 연구가 진행 중이다. 이를 통해서 CO₂가 대기 중으로 방출되는 양을 줄이고 재순환을 통해 산화제의 예열효과도 거둘 수 있어 현재 주목 받고있는 분야이다.

이에 수소-산소부화 연소 시 산화제의 희석제로 공급되는 질소를 이산화탄소로 대체하여 이에 의한 열전달의 변화를 실험적으로 살펴보고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험을 위하여 실험실 규모의 연소로와 연소기를 제작하였다. 실험장치는 크게 연소로와 연소기로 구성되어 있다. 연소기는 연소로 상단에 고정되어 연소로 내에서 화염이 하부 방향으로 형성되도록 구성되어 있다. 연료인 수소와 산화제인 공기, 산소, 이산화탄소는 면적식 유량계를 사용하여 공급하였다. 열전대와 열유속계로부터 나오는 신호는 미국 IOtech사의 pDAQ56 보드를 이용하여 획득하였다. Fig. 1에 실험장비의 대략적인 구성을 표시하였다.

2.1.1 연소로

연소로는 높이 100cm, 지름 50cm의 원통형 구조로 이루어져 있다. 연소로 외부에는 벽면 온도 측정을 위한 지름 3mm의 측정구, 내부 온도 측정을 위한 지름 10mm의 측정구, 벽면으로의 열전달량을 측정하기 위한 지름 40mm의 측정구를 상부로부터 100mm 간격으로 각각 제작하였다.

연소로 내부에는 단열재인 세라크올을 50mm의 두께로 벽면에 설치하여 연소로 내부로부터 외부로의 열전달을 최소화 하였다. Fig. 2에 연소로의 모양을 도시하였다.

2.1.2 연소기

본 실험에 사용된 연소기는 수소의 확산화염을 형성하도록 제작하였으며, 연소기의 틱에는 선회기(swirler)를 설치하여 화염을 안정화 시키도록 하였다. 연료가 공급되는 관의 지름은 18mm이고 그 외부에 산화제가 공급되도록 하였으며 이관의 지름은 28mm이다. 연소기 상단의 혼합실에는 공기, 이산화탄소, 산소를 공급하여 이들 가스의 안정적인 혼합과 공급을 보장토록 하였다.

연소기의 점화를 위하여 연소로 상부에 점화용 버너를 설치하여 연소로를 개폐하지 않고도 점화가 가능케 하였으며 점화 후에는 점화용 버너를 소기하여 이에 의한 영향이 없도록 하였다.

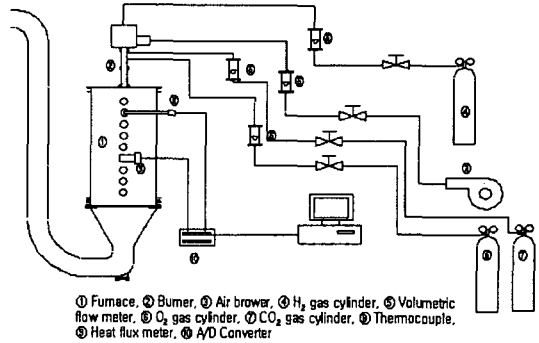
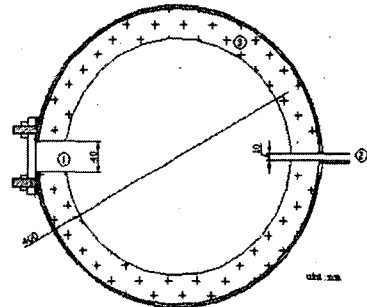
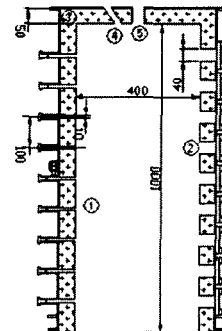


Fig. 1 Experimental set up



(a) Radial detail drawing of furnace



(b) Axial detail drawing of furnace

Fig. 2 Detail drawing of furnace

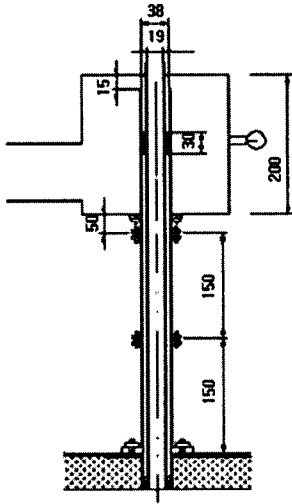
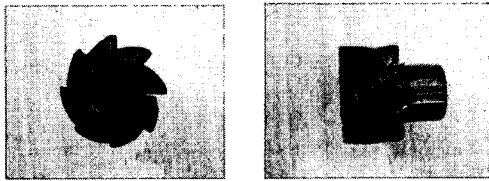


Fig. 3 Detail drawing of burner



(a) Upside view of swirler (b) Side view of swirler

Fig. 4 Swirler

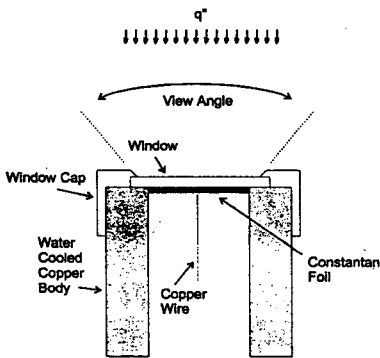


Fig. 5 Schematic diagram of heat flux meter

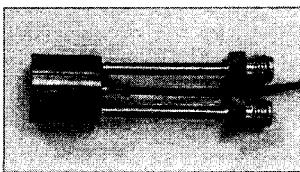


Fig. 6 Heat flux meter

2.1.3 선회기

본 연구에서는 공기에 선회(swirl)를 주어 혼합을 향상시켜 화염을 안정화 시켰다. 선회기의 형태는 vane angle 이 30° 인 radial flow guide vane swirler 를 제작하여 사용하였다. 선회각에 대한 선회수(swirl number, S)의 계산은 다음과 같은 관계식을 이용하였다.⁽⁵⁾

$$S = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right] \tan \theta$$

여기서 d 는 선회기의 내부 직경, d_h 는 선회기 허브의 직경, θ 는 선회기 vane 의 각도이다.

Fig. 4 에 선회기의 모습을 나타내었다.

2.2 측정장비

연소로 내부의 온도측정을 위하여 R-type 열전대를 사용하였다. 이를 이용하여 연소로 내부의 온도를 상부로부터 하부까지 10cm 간격으로 반경방향으로는 4~5cm 간격으로 측정하였다.

연소로 벽면으로의 열전달량 측정을 위해 미국 Vatel 사로부터 열유속 측정센서를 구입하여 사용하였으며, 제조사로부터 센서의 보정표를 받아 이를 이용하였다.

2.2.1 열전대

온도측정은 각기 다른 크기의 정점(bead)를 가진 열전대를 사용하여 각 지점에서의 온도를 측정하고 이 온도 정보를 가지고 외삽하여 정점의 크기가 0 일 때의 온도를 그 지점에서의 온도로 정의하였다.⁽⁶⁾

2.2.2 열유속계

열유속계는 입사되는 열유속에 비례하여 전압을 발생시키는 Gardon type 의 열유속계를 사용하였다. 벽면으로의 총열유속과 복사열유속을 측정할 수 있도록 두가지 종류의 센서를 구입하였다.

센서의 안정적인 사용을 위해서 냉각수를 공급하여야 하며, 센서의 전압 출력을 열유속으로 전환하기 위한 보정표를 제조사로부터 공급받아 이를 이용하여 열유속을 측정하였다. Fig. 5 와 Fig. 6 에 열유속계의 구조 및 모습을 나타내었다.

2.2.3 가스분석기

가스분석기는 이동형 가스 분석기로 NO, NO₂, CO, SO₂ 의 공해물질을 측정할 수 있다. 수냉식 포집관을 사용하여 가스 시료를 채취하며, 내부적으로 수분(H₂O)을 제거하고 측정한다. 자체적

으로 측정된 데이터는 기준이 되는 산소농도에 맞추어 자동환산이 되어 출력되어진다. 물질의 양은 ppm 단위로 측정된다.

가스분석기는 자체적으로 보정기능이 있으며, 약 30 분 단위로 보정기능이 작동되게 설계되어 있다. 또한 NOx 센서의 경우 열에 매우 민감하게 반응하므로 이에 대한 보호를 위해 수냉식의 포집관을 써야 했다. 측정결과는 기계에 탑재된 프린터를 통해 출력 가능하다.

2.3 실험과정

점화기를 이용하여 연소로 내의 연소기 팁에 점화를 한 후 연소로가 정상상태에 도달할 때까지 연소로 벽면에서의 온도를 측정한다. 연소로 벽면에는 K-type 의 열전대를 삽입하여 이의 신호를 DAQ 보드를 이용하여 측정하였고, 신호의 변화를 통해 정상상태를 확인한 후 열유속과 온도를 측정하였다.

2.4 실험조건

실험조건은 산소부화율(Ω)이 0.4, 0.5 인 경우에 대하여 각각 5 조건, 2 조건을 Table 1 과 같이 설정하였다. Table 1 은 공급되는 산화제의 부피비를 백분율로 나타낸 것으로, 산소부화율(Ω)이 0.4 인 경우는 5 조건을 실험하였고, 이의 검증을 위해 산소부화율(Ω)이 0.5 인 경우의 2 조건에서 실험을 수행하였다.

Table 1 Experimental conditions

Oxygen Enrichment Ratio (Ω) = 0.4			
CASE	O ₂ (%)	N ₂ (%)	CO ₂ (%)
CASE 1	40	60	0
CASE 2	40	40	20
CASE 3	40	30	30
CASE 4	40	20	40
CASE 5	40	0	60
Oxygen Enrichment Ratio (Ω) = 0.5			
CASE	O ₂ (%)	N ₂ (%)	CO ₂ (%)
CASE 6	50	50	0
CASE 7	50	0	50

3. 결과 및 고찰

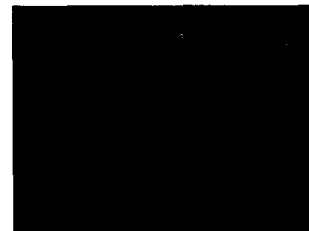
3.1 실험결과

3.1.1 $\Omega=0.4$ 인 경우의 화염

연소로 내부에서의 화염의 모습을 석영유리(quartz)로 이루어진 관측창을 설치하여 관찰하고 촬영하였다.

일반적인 수소-공기 연소에 산소 비율을 높였을 경우, 전통적인 무색의 수소-공기 화염에 비해 화염의 색변화가 생기는 것을 확인할 수 있다 또한 이산화탄소를 산화제에 공급할 경우 화염이 청염으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반적인 수소-공기 화염과는 매우 다른 현상이다.

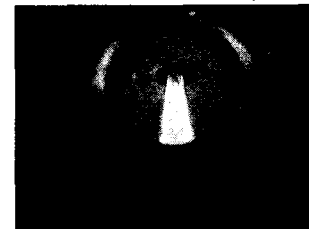
Fig. 7 에 관측창을 통하여 촬영한 화염의 모습을 나타내었다. 사진에서 상부의 점은 촬영용 카메라의 빛이 관측창에 반사되어 나타난 것이며, 수소-공기화염은 투명하여 파악하기 어렵다.



(a) Hydrogen-air flame



(b) Oxygen-enhanced hydrogen flame



(c) Oxygen-enhanced hydrogen flame with CO₂

Fig. 7 The shape of flame

3.1.2 $\Omega=0.4$ 인 경우의 온도

이산화탄소 첨가에 따른 온도변화를 살펴보기 위해서 위의 조건 중에 Case 1, Case 3, 그리고 Case 5 를 선택하여 Fig. 8 에 도시하였다. Case 1 은 순수한 산소부화연소를 의미하고, Case 3 은 이산화탄소와 질소가 같은 부피로 공급된 경우이며, Case 5 는 산소와 이산화탄소로 이루어진 산화제를 사용한 연소 상태이다.

Fig. 8 에서 살펴 볼 수 있듯이 산화제 중에 이산화탄소의 양을 증가시킬수록 상부에서 연소로 내의 온도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 기체간의 열적 특성의 차이로 기인한다. Table 2 에 질소와 이산화탄소의 정압비열값을 나타내었는데, 이산화탄소가 질소에 비해 단위 부피당 정압비열이 크며, 상온에 비해 고온에서 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다.⁽⁷⁾ 이로 인해 질소를 대신하여 공급된 이산화탄소는 보다 많은 열을 흡수하게 되고 화염온도는 감소하는 것이다.

화염 및 연소로 상부의 온도하강에 영향을 미치는 또 다른 요소로 이산화탄소의 화학적 작용이 있다. 이산화탄소가 고온의 반응영역에서 열분해 되면서 탄화수소 물질이 생성되고, 이들이 H, O, OH 같은 chain carrier 라디칼들의 생성을 억제함으로써 온도 하강에 영향을 준다.⁽⁸⁾

그러나 상류의 화염 부분과는 달리, 연소로 중심축에서 반경방향으로 먼 지점이나 하류 부분에서는 조건을 달리하여도 온도변화가 매우 작게 나타난다. 이 영역은 화염 같은 열원이 존재하지 않고 연소 후 생성물인 물(H₂O)과 이산화탄소(CO₂)의 농도가 높아지는 곳으로, 이들 기체들이 화염으로부터의 복사열을 흡수하는 것이다. 이는 이산화탄소 첨가에 의한 온도감소 효과를 상쇄하게 되어, 이들 지점에서 온도 변화는 매우 작아지게 된다. Fig. 9 에 중심축을 기준으로 한 반경방향의 온도분포를 나타내었다.

Table 2 Calculated specific heat capacity under constant pressure (unit : cal/mol·K)

Temperature (K)	CO ₂	N ₂
300	8.896	6.961
600	11.310	7.196
900	12.667	7.670
1200	13.446	8.061
1500	13.953	8.330
1800	14.269	8.512

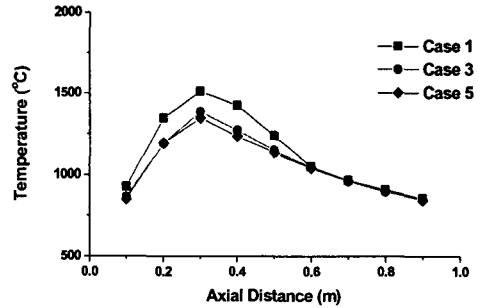
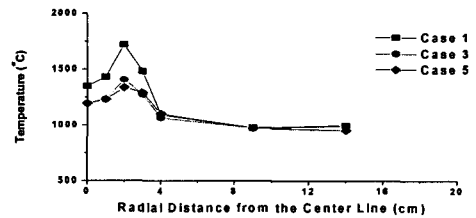
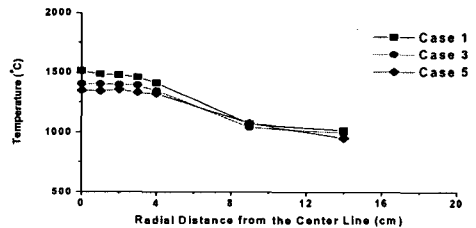


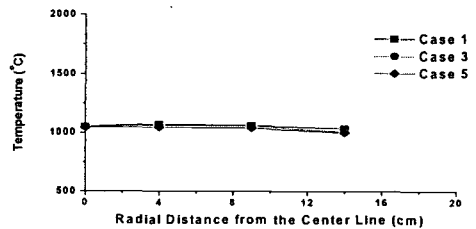
Fig. 8 Axial temperature distribution at the center



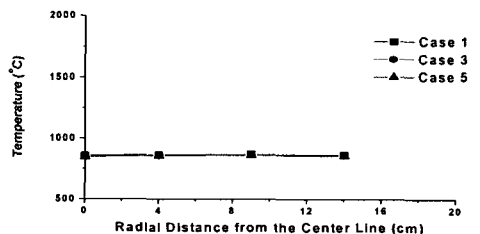
(a) z = 0.2 m



(b) z = 0.3 m



(c) z = 0.6 m



(d) z = 0.9 m

Fig. 9 Temperature distribution along radial direction

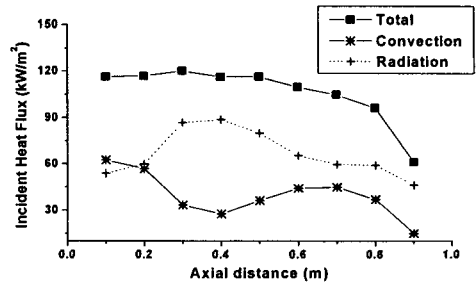
3.1.3 $\Omega=0.4$ 인 경우의 열전달

Fig. 10 에 화염으로부터 벽면으로의 열전달량을 도시하였다. 세가지 경우의 그래프를 비교하여보면, 산화제 중에 이산화탄소의 비율이 증가함에 따라 복사에 의한 열전달량은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 반면에 대류열전달과 복사열전달의 합인 총열전달은 이산화탄소의 양이 커짐에 따라 소폭 증가한다.

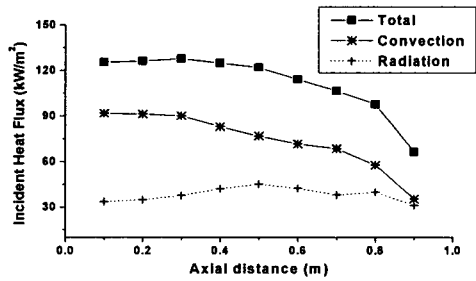
질소에 비해 분자량이 크고 정압비열이 큰 이산화탄소를 공급함으로써 화염온도는 낮아지게 된다. 또한 연소실 내로 공급되는 이산화탄소가 강한 복사열전달 흡수체로서의 역할을 하게 되어, 그 양이 증가될수록 벽면으로 입사되는 복사열전달의 크기도 작아지게 되는 것이다. 이는 이산화탄소가 연소로 내에서 마치 대기의 온실효과 (green house effect)와 같은 효과를 유발하여, 화염으로부터 벽면으로의 복사열전달에 참여하는 전자기파를 막는 열차폐(heat blockage)효과를 일으킨 것이다. Fig. 8 과 Fig. 10 을 보면 하류부분에서 온도변화는 거의 없으나 벽면으로의 복사열유속은 감소했음을 알 수 있다. 이것은 이 부분에서의 복사열유속 감소가 온도변화 보다는 이산화탄소의 열차폐 효과에 의한 것임을 보여주는 것이다. Fig. 10 에서 화염이 존재하는 상류부분은 이산화탄소 첨가에 의한 복사열유속 감소폭이 약간 더 크게 나타난다. 이는 화염온도의 하강으로 인한 복사열전달 감소 효과가 이산화탄소의 열차폐 효과와 더불어 작용하는 것으로 볼 수 있다.

산화제 중의 질소를 대체하여 공급된 이산화탄소의 양이 증가할수록 기체복사에 참여하는 이산화탄소의 양 또한 증가하게 된다. 이산화탄소는 화염으로부터 복사열전달 파장을 흡수하여 자신의 에너지를 높이게 된다. 이는 산화제로 질소가 공급될 때보다 높은 에너지를 가지게 되고 이로 인해 벽면으로의 복사열전달은 줄어든다. 반면에, 높은 에너지를 가진 이산화탄소의 흐름이 이바지하는 대류열전달에 의한 열유속은 증가하게 된다.

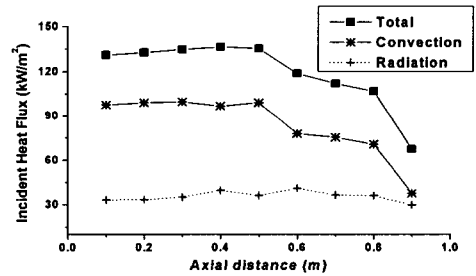
또한 산화제 중의 이산화탄소 양이 증가하게 되면, 부피를 기준으로 하여 질소를 이산화탄소로 대체한 만큼, 산화제의 질량이 커지게 되고 연소기 텀으로부터 나오는 유동의 운동량이 증가하게 된다. 이로 인해 연소로 내의 유동장 변화가 생기게 되며, 선회기를 통과한 유동에 의해 벽면으로의 운동량 또한 증가하게 되어 총열유속 또한 증가하는 것이라 할 수 있다.



(a) Case 1



(b) Case 3



(c) Case 5

Fig. 10 Incident heat fluxes for Case1, Case3 and Case5

3.1.4 $\Omega=0.4$ 인 경우의 NOx

연소 후 생성물 중 대표적인 환경오염 물질인 질소산화물(NOx)은 Thermal NOx, Prompt NOx, Fuel NOx 와 같이 크게 세 가지의 형태로 발생된다고 규명되어 있다.

본 연구에서는 수소-산소부화 화염을 생성하므로 산소부화연소의 특성상 고온의 화염이 생성되어진다. 결국 질소산화물이 발생하는 세가지 형태 중에서 고온영역에서 공기중의 질소와 산소가 반응하여 발생하는 Thermal NOx 가 본 연구의 주요 질소산화물 발생원인으로 볼 수 있다.

본 실험에서는 가스분석기를 이용하여 NOx 의

Table 3 NOx detection at the center (unit:ppm)

Distance(m)	Case 1	Case 3	Case 4
at z=0.4	3021	1349	1247
at z=0.6	3008	1268	1144
at z=0.8	3068	1756	1178

양을 측정하였다. 연소로의 중심축에서 측정된 NOx 양을 Table 3 에 정리하여 세가지 경우를 비교하였다.

Table 3 을 살펴보면 산화제 중에 포함된 이산화탄소의 비율이 증가할 수록 NOx 의 발생량이 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급된 이산화탄소가 화염온도를 감소시키고, 고온영역의 열복사를 흡수하면서 연소로 내 고온영역을 줄이게 되어, Thermal NOx 의 발생이 줄어들기 때문이다.

3.1.5 $\Omega=0.5$ 인 경우의 NOx, 열전달

산소부화율(Ω)이 0.5 인 경우에 대해서 제한적으로 두 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 이는 산소부화율이 0.4 인 경우의 실험에 대한 검증을 위해서 수행된 것이다.

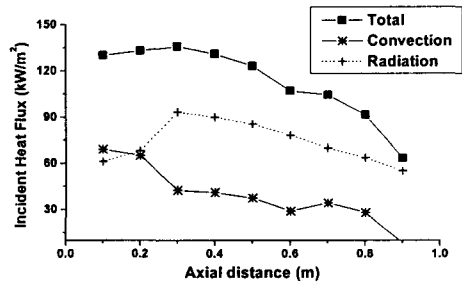
NOx 의 발생량을 산소부화율(Ω)가 0.4 일 때의 Case 1 과 산소부화율(Ω)가 0.5 인 Case 6 과 비교하면 Table 4 와 같다. 연소로의 상부로부터 0.4m 떨어진 위치에서의 NOx 의 증가율을 살펴보면 2 배가 넘는 정도로 급격히 NOx 가 증가한다. 다른 두 위치에서는 가스분석기의 측정 범위를 넘어서게 되어 측정이 불가능하였다. 산소부화정도가 증가함에 따라 화염 및 전체 유동장의 온도가 상승했기 때문이다.

열전달의 형태는 $\Omega=0.4$ 인 경우와 같은 결과를 보여준다. Fig. 11 은 $\Omega=0.5$ 인 두 가지 실험조건에서 측정된 열전달량을 나타낸 것이다. 산화제 중의 질소를 모두 이산화탄소로 대체하였을 경우 Fig. 11 에서와 같이 벽면으로의 복사열유속은 감소하나 총열유속은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 3.1.3 절의 내용과 같이 이산화탄소가 산화제에 공급되면서 화염온도는 낮아지게 되고 연소기 텀으로부터 나오는 운동량은 증가된 것이라 할 수 있다. 이로 인해 총열유속이 증가하게 되는 것을 재차 확인할 수 있다.

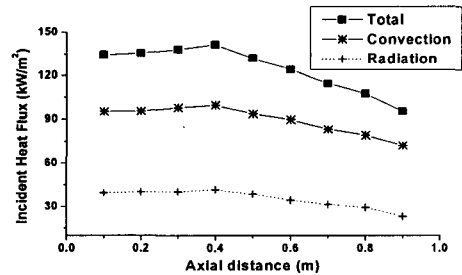
산화제 중의 질소를 이산화탄소로 대체할 경우 벽면으로의 열전달 중에 대류에 의한 열전달이

Table 4 NOx detection at the center (unit:ppm)

Distance(m)	Case 1	Case 6
at z=0.4	3021	7955
at z=0.6	3008	-
at z=0.8	3068	-



(a) Case 6



(b) Case 7

Fig. 11 Incident heat fluxes for Case 6 and Case 7

주된 열전달 모드가 되며 복사에 의한 열전달은 크게 감소한다.

4. 결론

(1) 이산화탄소의 공급량이 증가할수록 연소로 내의 온도는 낮아지게 된다. 이는 공급되는 이산화탄소가 질소에 비해 분자량과 정압비열이 크고, 화학적인 효과도 동반하기 때문이다. 결국 연소로 내의 온도는 이산화탄소의 공급량이 늘어날수록 감소하게 된다.

(2) 질소보다 온도 감소 효과가 큰 이산화탄소가 공급됨에도 불구하고 연소장내의 온도감소는 10% 미만인 것을 확인할 수 있다. 이는 산화제로 공급된 이산화탄소가 광학적으로 두꺼운 가스

역할을 하게 되면서 화염으로부터의 복사열전달을 흡수하기 때문이며, 이로 인해 연소로 내의 온도 감소폭이 적은 것이다.

(3) 산화제 중의 질소를 이산화탄소로 대체하여 그 양을 증가시킬 경우 NO_x의 발생량이 감소하였다. 이는 이산화탄소의 공급량이 증가할 경우 연소로 내의 온도가 낮아지기 때문이며, 또한 공급된 이산화탄소가 화염으로부터의 열복사를 흡수하면서 연소로 내의 온도를 균일하게 만들기 때문이다. 따라서 연소로 내의 고온 영역이 줄어들게 되며, 이러한 환경에서 생성되기 쉬운 Thermal NO_x의 생성이 억제된 것이다.

(4) 산화제 중의 이산화탄소가 화염으로부터의 복사열전달을 흡수하게 되어 결국은 대류에 의한 열전달이 총열전달의 주된 역할을 하게 된다. 이로 인해 이산화탄소 공급 이전에 전체 열전달량의 60% 정도를 차지하던 복사열전달량이 30% 정도로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉 이산화탄소의 공급으로 인해 대류열전달이 주된 열전달 모드로서 작용하게 된다.

(5) 공급되는 이산화탄소의 양을 증가시킬수록 총열전달량이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 산화제 중에 이산화탄소의 양이 증가할수록 연소기 텀으로부터 나오는 산화제의 운동량이 증가하기 때문이다. 따라서 연소기 텀에서 운동량이 증가된 유동이 선화기를 통과하여 벽면으로 전달되고, 이로 인해 벽면으로의 총열유속 또한 증가하게 된다.

후 기

이 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 수행되었음(KRF-2002-041-D00074).

참고문헌

- (1) Melvin, A., 1980, "The Diffusive Combustion of Hydrogen," *Hydrogen Energy Progress*, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 1177~1183.
- (2) Suzuki, K., Maki, H. and Maesawa, M., 1980, "Studies on Swirling Diffusion Flames of Hydrogen - Effect of Swirl Number and Gas Velocity on Flame Height," *Hydrogen Energy Progress*, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 1187~1198.
- (3) Sano, H., Nakamura, T., Haruta, M., Tooyama, I. and Souma, Y., 1980, "NO_x Control and Flashback Avoidance for Hydrogen Burner," *Hydrogen Energy Progress*, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 1215~1229.
- (4) Charles, E. B. and Benjamin, G., 1997, "Oxygen-Enhanced/Natural Gas Flame Radiation," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 11, pp. 2539~2547.
- (5) Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, ABACUS PRESS, OHU.
- (6) Ahn, K. Y., 1994, "A Study on the Ignition and Combustion of Coal-Water Slurry Droplet," *Ph.D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon, Korea, in Korean.*
- (7) Stull, D. R. and Prophet, H., 1971, *JANAF Thermochemical Tables - second edition*, NSRDS.
- (8) Lee, K. M. and Park, J., 2004, "A Numerical Study on Chemical Effects of CO₂ Addition to Oxidizer and Fuel in H₂-O₂ Counterflow Diffusion Flames," *Tran. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 4, pp. 371~381.