

이산화탄소가 수소 산소부화 화염의 열전달에 미치는 영향

이창엽* · 최준원** · 백승욱***

The Effects of CO₂ on Heat Transfer from Hydrogen Oxygen-enriched Flame

Chang Yeop Lee*, Joon Won Choi** and Seung Wook Baek***

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to evaluate the effects of CO₂ on heat transfer from hydrogen oxygen-enriched flame. Experiments were performed on flames stabilized by a co-flow swirl burner, which mounted on top of the furnace. Five composition conditions of oxidizer were chosen with replacing N₂ with CO₂. In a steady state, total and radiative heat flux rates from the flame to the wall of furnace has been measured using heat flux meters. Temperature distribution in furnace also has been checked. Increasing CO₂ ratio in the oxidizer, the dominant heat transfer mode was changed into convection from radiation. Temperature in the furnace decreased but total heat flux increased.

Key Words : Hydrogen, Oxygen-enriched, CO₂, Heat transfer, Radiation, Convection, Heat flux meter, Diffusion flame

기 호 설 명

Ω 산소부화비율(Oxygen Enrichment Ratio)

Φ 당량비(Equivalence Ratio)

1. 서 론

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

수소는 그 사용가능성 뿐만 아니라 공학적으로도 매우 우수한 성질을 가지고 있는 연료이다. 그러나 생산, 보관, 및 사용에 따른 고비용과 위

험성 때문에 그동안 에너지로서 사용되지 못하였다. 기술의 발달로 인해 이러한 문제점이 해결되면서 수소의 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_x제어 및 역화현상(Flashback) 억제를 위한 실험을 하였다.

산소부화연소는 고효율의 연소기를 제작하기 위해 도입된 기술로서 산화제 중의 산소의 비율을 증가시켜서 연소성능을 향상시키는 방법이다. 연료-공기 연소에 비해서 화염의 온도는 상승하며 산화제 중의 희석제 양이 감소되어 열전달 효

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

† E-mail: futurist@kaist.ac.kr, Tel: (042) 869-5754

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 교수

율이 높아지는 특징을 가지고 있다. Baukal 과 Gebhart[4]는 천연가스(LNG)에서의 산소부화 연소 시 복사열전달에 관한 실험을 수행하였다.

CO₂는 지구온난화의 주범으로 규제대상으로 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 주목받고 있는 분야이다.

이에 수소-산소부화연소시 산화제의 회석제로 공급되는 질소를 이산화탄소로 대체하며 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 IOtech 사의 pDAQ56보드를 이용하여 획득하였다. Fig.1 에는 실험장치의 대략적인 구성을 표시하였다.

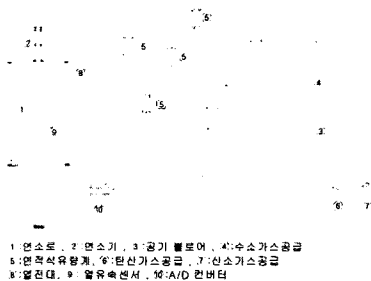


Fig. 1 Experimental set up

2.1.1 연소로

연소로는 높이 100cm, 지름 50cm의 원통형 구조로 이루어져 있다. 연소로 외부에는 벽면의 온도를 측정하기 위해 지름 5mm 측정구, 연소로 내부의 온도를 측정하기 위한 지름 50mm의 측정구와 벽면으로의 열전달량을 측정하기 위한 지

름 100mm의 측정구를 상부로부터 10cm간격으로 각각 제작하였다. 연소로 내부에는 단열재로 쓰이는 세라크올을 50mm두께로 벽면에 설치하여 연소로 내부로부터 외부로의 열전달을 최소화하고자 하였다.

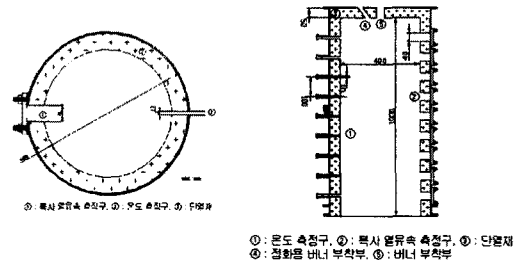


Fig. 2 Detail drawing of furnace

2.1.2 연소기

본 실험에 사용된 연소기는 수소의 확산화염을 형성하도록 제작하였으며 연소기의 탑에는 배인각이 30°인 선회기(swirler)를 설치하여 화염을 안정화시키도록 하였다. 연료가 공급되는 지름은 18mm이고 그 외부에 산화제가 공급되도록 하였으며 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 가능하게 하였으며 점화 후에는 점화용 버너를 소기하여 이에 의한 영향이 없도록 하였다.

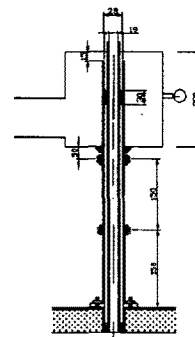


Fig. 3 Detail drawing of the combustor

2.2 측정장비

연소로 내부의 온도측정을 위하여 R-type 열전대를 사용하였다. 이를 이용하여 연소로 내부의 온도를 상부로부터 하부까지 10cm간격으로 반경 방향으로는 4~5cm간격으로 측정하였다.

연소로 벽면으로의 열전달량 측정을 위해 미국의 회사로부터 열유속 측정센서를 구입하여 사용하였으며 제조사로부터 센서의 보정표를 받아 이를 이용하였다.

2.2.1 열전대

온도 측정은 각기 다른 크기의 정점(bead)를 가진 열전대를 사용하여 각 지점에서의 온도를 측정하고 이 온도 정보를 가지고 외삽하여 정점의 크기가 0일 때의 온도를 그 지점에서의 온도로 정의하였다.[5]

2.2.2 열유속계

열유속계는 입사되는 열유속에 비례하여 전압을 발생시키는 Gardon type 열유속계로서 벽면으로의 총열유속과 복사열유속을 측정할 수 있도록 센서를 각각 구입하였다. 센서의 안정적인 사용을 위해서 냉각수를 공급하여야 하며 각각의 센서의 전압 출력을 열유속으로 전환하기 위한 보정표를 제조사로부터 공급받아 이를 이용하여 열유속을 측정하였다.

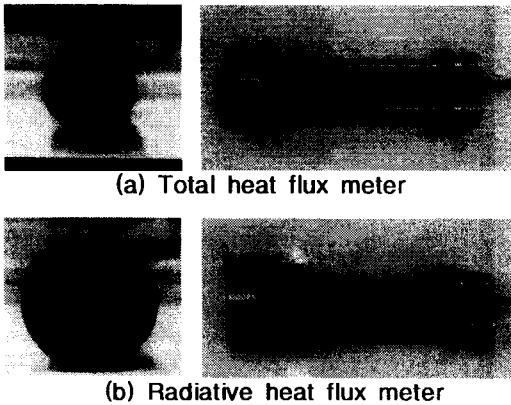


Fig. 4 Heat flux meter

3. 실험결과

3.1 실험과정

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

3.2 실험조건

실험조건은 다음과 같이 산소부화율(Q)이 0.4, 0.5 인 경우에 대하여 각각 5조건, 2조건을 Table.1 과 같이 설정하였다.

공급되는 산화제의 부피비를 백분율로 나타낸 것으로 산소부화율(Q)이 0.4인 경우는 5조건을 실험하였고 이의 검증을 위해 산소부화율(Q)이 0.5 인 2조건으로 실험을 수행하였다.

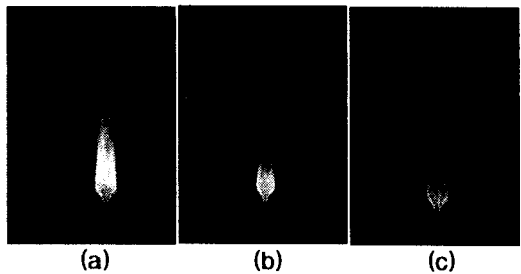
산소부화율(Q) = 0.4			
CASE	산소(%)	질소(%)	CO ₂ (%)
CASE 1	40	60	0
CASE 2	40	40	20
CASE 3	40	30	30
CASE 4	40	20	40
CASE 5	40	0	60
산소부화율(Q) = 0.5			
CASE	산소(%)	질소(%)	CO ₂ (%)
CASE 6	50	50	0
CASE 7	50	0	50

Table 1 Composition of oxidizer

3.3 화염

연소로 내부에서의 화염의 모습과 연소기를 외부로 노출시키고 이의 위에 석영유리관(quartz tube)를 설치한 화염의 모습을 촬영하였다.

일반적인 수소의 공기연소에 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.

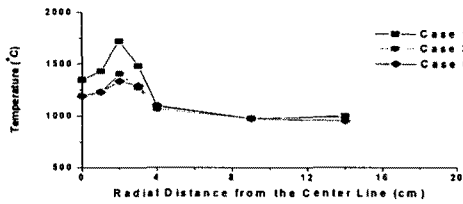


(a) O₂ : 40 %, N₂ : 60 %
 (b) O₂ : 40 %, N₂ : 30 %, CO₂ : 30 %
 (c) O₂ : 40 %, CO₂ : 60 %

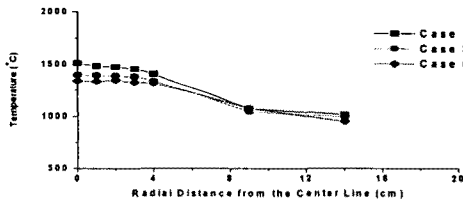
Fig. 5 Flames for various oxidizer composition

3.3 온도

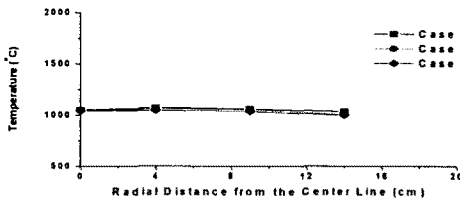
산소부화율(Ω)이 0.4인 경우의 CASE 1, CASE 3 그리고 CASE 5 의 온도의 변화를 Fig.6 에 나타내었다. 측정은 연소로 상단으로부터 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.6m, 0.9m인 위치에서 이루어졌다. 결과에서 보이듯이 산화제 중의 질소를 이산화탄소로 대체할 경우 화염대의 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 공급되는 이산화탄소가 질소에 분자량이 1.5배에 이르고 정압비열도 크기 때문이다. 그러나, 화염 후 영역으로 고려할 수 있는 상부로부터 0.6m이하는 이산화탄소로 대체하였을 경우에도 온도 감소폭이 매우 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 공급되는 이산화탄소가 화염으로부터의 복사열을 흡수하기 때문이다.



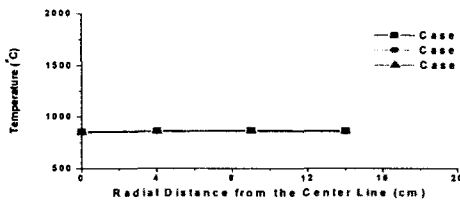
(a) z = 0.2 m



(b) z = 0.3 m



(c) z = 0.6 m



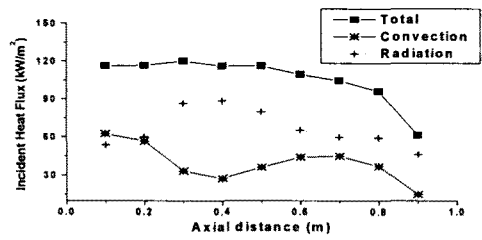
(d) z = 0.9 m

Fig. 6 Temperature distribution along radial direction

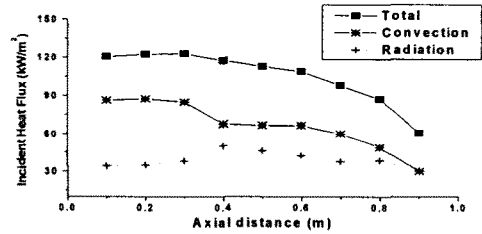
3.4 열전달

3.4.1 산소부화율(Ω)=0.4인 경우의 열전달

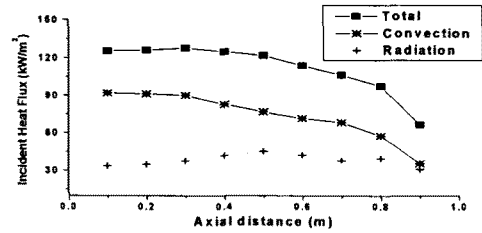
Fig.7 는 각 경우의 열전달의 결과이다. 이를 살펴볼 경우 산화제 중의 이산화탄소의 비율을 높일수록 주된 열전달 방식이 복사열전달에서 대류열전달로 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 공급되는 이산화탄소가 기체복사에 활발하게 참여함으로써 화염으로부터 벽면으로의 복사열을 흡수하기 때문이다. 즉 이산화탄소가 강한 복사열 흡수체로서 작용하게 되어 총열전달모드 중 주된 열전달 모드가 대류로 변화된 것이다.



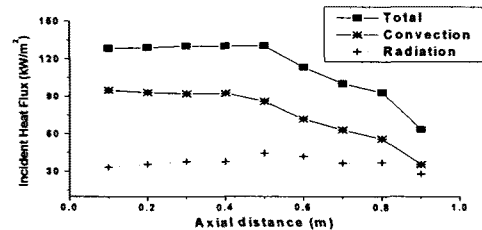
(a) Heat fluxes for case 1



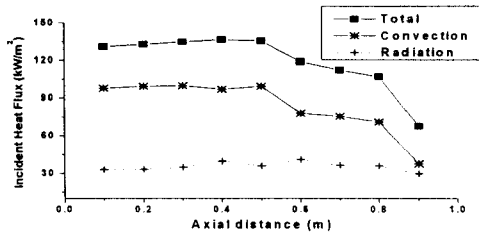
(b) Heat fluxes for case 2



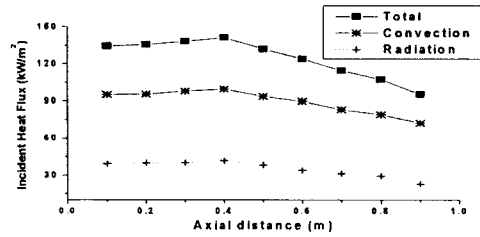
(c) Heat fluxes for case 3



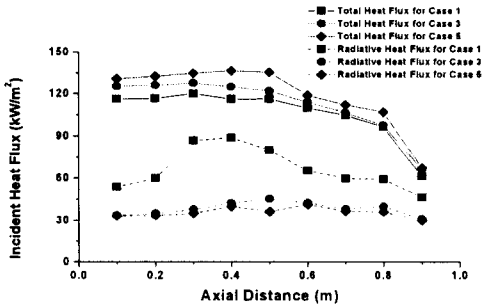
(d) Heat fluxes for case 4



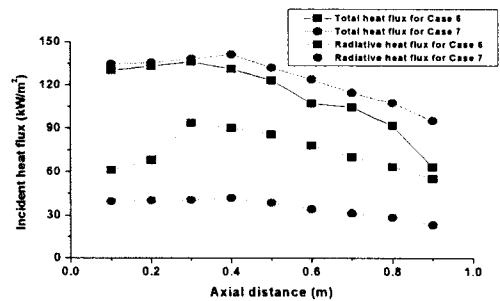
(e) Heat fluxes for case 5



(b) Heat fluxes for case 7



(f) Heat fluxes for each case



(c) Heat fluxes for each case

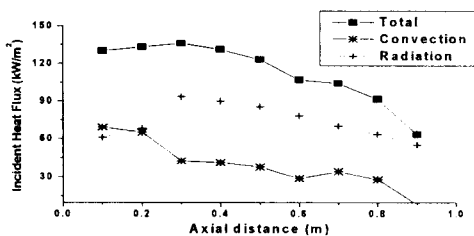
Fig. 7 Incident heat fluxes for $\Omega = 0.4$

Fig. 8 Incident heat fluxes for $\Omega = 0.5$

3.4.2 산소부화율(Ω)=0.5인 경우의 열전달

산소부화율(Ω)이 0.4 인 경우의 검증을 위해 Table.1 과 같이 산화제의 구성을 산소와 질소, 산소와 이산화탄소로 나누어 두가지 조건에 한하여 실험을 실시하였다.

$\Omega=0.4$ 인 경우와 같은 결과를 볼수 있다. 3.4.1 절의 내용과 같이 이산화탄소가 산화제에 공급되면서 화염온도는 낮아지게 되고, 연소기 텃으로부터 나오는 운동량은 증가하여 총열유속이 증가하게 되는 것을 재차 확인할 수 있다. 이때 벽면으로의 열전달 중에 대류에 의한 열전달이 주된 열전달 모드가 되며 복사에 의한 열전달은 감소되는 현상도 관찰되어 진다.



(a) Heat fluxes for case 6

4. 결론

- 1) 이산화탄소의 공급량이 증가할수록 연소로 내의 온도가 낮아지게 된다. 이는 질소에 비해 분자량이 1.5배나 크고 정압비열도 큰 이산화탄소가 공급되기 때문에 연소로 내의 온도가 이산화탄소의 공급량이 늘어날수록 감소하게 된다.
- 2) 질소보다 분자량이 1.5배나 큰 이산화탄소가 공급됨에도 불구하고 연소장내의 온도감소는 10% 미만인 것을 확인할 수 있다. 이는 산화제로 공급된 이산화탄소가 광학적으로 두꺼운 가스 역할을 하게 되어 화염으로부터의 복사열전달을 흡수하여 연소로 내의 온도 감소폭이 적은 것이다. 이는 연소로 내에서 마치 대기의 온실효과 (green house effect)처럼 작용하여 화염으로부터 벽면으로의 복사열전달에 참여하는 전자기파를 막는 열차폐(heat blockage)효과를 보여준다.
- 3) 산화제 중의 질소를 이산화탄소로 대체하여 그 양을 증가시킬 경우 NO_x의 발생량이 감소하였다. 이는 이산화탄소의 공급이 증가할 경우 연소로 내의 온도가 낮아지게 되고 공급된 이산화탄소가 화염으로부터의 열복사를 흡수하면서 연소로 내의 온도가 균일해지게 된다. 따라서 연소로 내의 고온 영역이 줄어들게 되며 이러한 환경에서 생성되기 쉬운 Thermal NO_x의 생성이 억

제된 것이다.

4) 산화제 중의 이산화탄소가 화염으로부터의 복사열전달을 흡수하게 되어 결국은 대류에 의한 열전달이 총열전달의 주된 역할을 하게 된다. 이로 인해 전체 열전달량의 60%를 차지하던 복사에 의한 열전달량이 30%로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 즉 이산화탄소의 공급으로 인해 대류열전달이 주된 열전달 모드로서 작용하게 된다.

5) 공급되는 이산화탄소의 양을 증가시킬수록 총 열전달량이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 이는 산화제 중의 이산화탄소의 양이 증가할수록 연소기 팁으로 나오는 산화제의 운동량이 증가하게 된다. 따라서 연소기 팁에서 운동량이 증가된 유동이 선회기를 통과하여 벽면으로 전달되고 이로 인해 벽면으로의 총열유속 또한 증가하게 된다.

and combustion of coal-water slurry droplet", thesis of Ph.D., Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1994

후 기

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

참고문헌

- [1] A. Melvin, "The Diffusive combustion of Hydrogen", Hydrogen Energy Progress (Proceedings) of the 3rd World Hydrogen Energy conference, Tokyo, Japan 23-28 June 1980, Vol. 2, 1980, pp. 1177-1183.
- [2] K. Suzuki, H. Maki, and M. Maesawa, "Studies on Swirling Diffusion Flames of Hydrogen - Effect of Swirl Number and Gas Velocity on Flame Height", Hydrogen Energy Progress (Proceedings) of the 3rd World Hydrogen Energy conference, Tokyo, Japan 23-28 June 1980, Vol. 2, 1980, pp. 1187-1198.
- [3] H. Sano, T. Nakamura, M. Haruta, I. Tooyama, and Y. Souma, "NOx Control and Flashback Avoidance for Hydrogen Burner", Hydrogen Energy Progress (Proceedings) of the 3rd World Hydrogen Energy conference, Tokyo, Japan 23-28 June 1980, Vol. 2, 1980, pp. 1215-1229
- [4] Charles E. Baukal and Benjamin Gebhart, "Oxygen-enhanced/Natural Gas Flame Radiation", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 11, 1997, pp.2539-2547.
- [5] Kook Young Ahn, "A study on the ignition