

선회 확산버너에서 산소부화가 연소장에 미치는 영향

이용후* · 이진석* · 이우섭** · 이도형***

Effect of Oxygen Enrichment in a Swirling Diffusion Gas Burner

Yong Hoo Lee*, Jin Seok Lee*, Woo Seob Lee**,
and Do Hyung Lee***

Abstract

To investigate the combustion characteristics of a swirling diffusion gas burner with oxygen enrichment, mean temperature, CO, CO₂, and HC concentrations were measured at various oxygen enrichment conditions. According to the results, the flame temperature increased and the region of high temperature was expanded with increasing oxygen concentration. The CO₂ concentrations increased, while the CO concentrations decreased in proportion to the increase of oxygen concentration. On the other hand, the HC concentrations were decreased and this tendency was very strong at the downstream of the combustor.

Key Words: Oxygen enrichment, Diffusion combustion, Swirl flow, High-efficient combustion

1. 서론

현대사회의 산업화와 기계문명의 발달과 함께 에너지의 소비는 급증하고 있으며, 주성분 탄화수소인 연료는 질소산화물 및 미연탄화수

소, 매연 등 여러 가지 오염물질을 배출시키고 있어 이러한 오염물질들은 대기오염에 대한 규제강화와 더불어 더욱더 중대한 관심사로 부각되고 있다. 특히 기후변화협약과 관련된 온실가스의 하나인 이산화탄소의 배출량감소를 위해서는 고효율 연소기술의 개발이 요구되어지고 있으며, 이와 함께 배기가스 문제와 대체에너지의 개발이 더욱더 요구되어지고 있다. 이러한 문제해결의 일환으로 공기를 산소원으로 사용

* 부경대학교 대학원

** 동환산업(주) 기술연구소 연구원

*** 부경대학교 기계공학부

하는 연소장치에서 원천적으로 배기가스량을 줄이고, 열효율을 증대시키는 방법으로 연소용 공기중에 산소를 첨가하여 연소시키는 산소부화 연소법이 있다. 이 방법은, 연소가스의 부피가 줄어 화염온도가 상승하게 되고 배기가스량이 줄어 손실열량이 감소하게 되는 등의 이점이 있어 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다[1]. 또한 온실효과의 주원인인 이산화탄소를 분리·회수하는데 있어서 산소부화는 다른방법에 비해 매우 우수한 것으로 알려져 있다[2].

이러한 산소부화에 대한 기존의 연구들을 살펴보면, Taschler D. R. 등[3]은 석탄-물 슬러리(CWM)의 연소시에 약 4%정도 산소농도를 증가시켜서 착화 및 화염의 안정을 이룰 수가 있다고 발표하였으며, 井藤博達 등[4]은 강편 가열로, 세라믹 소성로, 유리 용해로 등에 산소부화 연소시험을 하여 27%의 산소부화공기를 사용하여 강편가열시간을 약 30% 단축시킬 수가

있으며, 세라믹 소성로에서는 약 26%의 에너지를 절약 할 수 있었다고 발표하였다. 또한 로타리킬른식 소각로에서 산소농도 증가에 따라 활성화에너지 감소, 높은 온도 유지, 연소 공기량 및 불완전 연소생성물 발생량의 감소에 의한 대기오염 방지시설의 소규모화를 이룰 수 있다고 보고한 바 있다[5].

그러나, 산소부화 농도에 따른 연소실내의 온도, 농도 등에 관한 조사 및 화염장에 끼치는 영향을 상세히 조사한 보고는 미미한 상태이다.

본 연구실에서는 선회확산버너에서 2차공기 주입 및 NOx 분포 등에 대해 연구한 바가 있다 [6,7]. 따라서, 본 연구에서는 선회확산버너에서 산소농도 변화에 따른 연소기 내부의 평균 온도와 CO₂, CO, HC 및 O₂의 농도를 측정하여, 산소부화 농도변화에 따른 화염구조와 연소특성을 밝힘으로써, 효율적인 에너지 이용과 오염물질저감에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치 및 방법

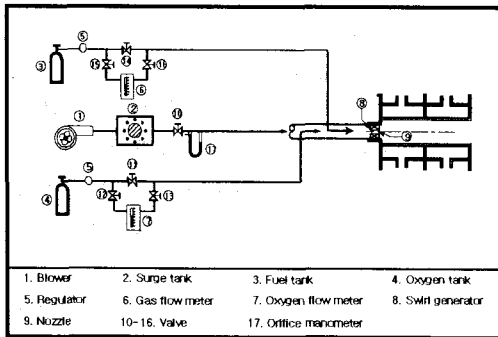


Fig. 1 Schematic diagram of swirling diffusion gas burner

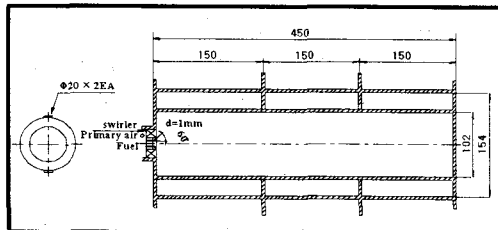


Fig. 2 Detail diagram of swirling diffusion gas burner

Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에서 사용된 선회 확산버너의 실험장치도로서 공기와 연료공급계 및 연소기의 상세도를 나타낸 것이다. 유입되는 공기송풍기(3HP)에서 직경 52mm의 공기공급 원관을 통하여 공급되며, 압력맥동을 최소화하기 위해 서지탱크(surge tank)를 거친 후, 총류 유량계(SOKKEN LFE-100B)에 의해 검증된 오리피스 마노메타의 수두차로 유량을 조절하였다. 이때 축방향으로 선회각도 0.42(선회익각 30°)를 가지는 선회익이 부착된 선회발생기(swirl generator)를 통하여 공급 되도록 하여, 연료와 공기의 혼합촉진과 화염안정화를 도모하였다. 연료는 상용 프로판가스(C₃H₈)를 이용하였으며, 압력조절 밸브와 유량계(Flow cell, No. 007574)를 거쳐 연료노즐(분사각 60도 분공 8개

직 1.0mm)로부터 분사되어 연소기 내부로 공급된다. 산소부화용 산소는 순도 99.5%의 공업용 산소를 사용하였으며, 연소영역으로 유입되는 공기 유로의 중간에 산소공급노즐을 설치하고, 주류방향 공기와 산소가 균일하게 혼합되도록 공급하여 연소기에 유입되며, 산소탱크, 압력조정기, 밸브 및 산소유량계(SHK-1 Series)를 거쳐 산소공급노즐에 의해 공급되도록 하였다.

2.2. 실험조건

실험조건으로는 Table 1과 같이 공급 공기량을 줄이고 줄어든 만큼의 산소량을 공급하는 산소 등량부화 방법에 의한 첨가 산소량에 따른 산소농도의 변화에 따라 평균 온도, 연소가스 및 화염의 형상 등을 측정·관찰하여 이들의 상관관계를 분석하여 산소부화에 따른 가스터빈 연소기의 연소특성을 조사하였다. 여기서, X는 산소부화농도(%), Q_f 는 공급 연료량, Q_a 는 공급 공기량(ℓ/sec), 그리고 Q_{oxy} 는 산소첨가량(ℓ/sec)을 나타낸다. 이때 Flame1 조건의 공기비는 5.68이다.

Table 1. Rates of oxygen enrichment at equivalent oxygen enrichment (단위 : ℓ/sec)

	X	Q_f	Q_a	Q_{oxy}
Flame 1	21	0.1	13.53	0.00
Flame 2	23		11.95	0.33
Flame 3	26		10.36	0.67
Flame 4	29		8.77	1.00

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 선회각도 0.42(선회각각 30°)인 경우에 있어서 형성된 화염의 산소부화농도가 (a) 21%, (b) 23%, (c) 26%, (d) 29%인 경우의 화염의 직접사진이다. 이 사진을 살펴보면 산소부화농도가 증가함에 따라 뚜렷한 발광화염부, 즉 백염이 관찰되고 화염의 반경방향 폭이 하류영역으로 가면서 증가하고 있다.

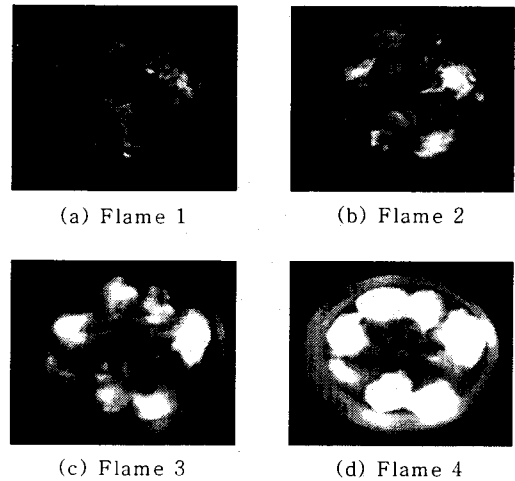


Fig. 3 Direct photographs of the four types of flame

Fig. 4는 연소기의 중심 축에서 축 방향 위치 변화에 따른 반경방향으로의 온도분포를 각각 측정하여 연소장내의 등온선 분포를 나타낸 것이다. 이 분포를 살펴보면 연소반응이 활발히 진행된다고 생각되는 안정된 구역인 선회류선 영역은 화염장내에서 가장 높은 온도분포를 가지고 있으며 공기중의 산소농도가 증가할수록 이 영역내의 온도는 점차적으로 증가해 감을 알 수 있는데 이것은 다른 영역에 비해 공기 분류에 포함된 산소와의 충분한 접촉 때문으로 생각된다.

전체적으로 산소부화농도가 증가할수록 하류로 갈수록 화염의 반경방향 폭이 커지고 하류영역에서의 온도분포가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고온의 영역이 다소 넓어지는 경향으로 나타났으며, 산소부화농도가 증가하는 경우 다소 화염의 진동현상이 나타났다.

그리고 전체적으로 축 방향 $Z=40\sim60mm$, 반경방향 $R=25\sim35mm$ 부근에 고온영역이 존재하게 되는데, 이것은 산소부화 농도가 증가할수록 연소성의 개선으로 인한 연소속도의 증가와 재순환영역의 확장에 기인하고, 이 때의 화염색깔은 발광화염 즉 백염의 형태를 취한다. 이것은 화염의 직접사진과 잘 일치하고 있다.

또한 산소부화농도의 증가에 따른 화염장내에서의 화염길이는 거의 변화가 없고 화염폭이 화염의 상류영역에서 약간 증가하여 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 산소와 공기의 혼합촉진으로 연소성이 개선된 것으로 생각된다.

Fig. 5는 반경방향 단면의 평균 온도 분포를 축 방향거리에 따라 나타낸 것이다. 이들은 전반적으로 각 화염의 형상에 잘 대응하는 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산소부화농도가 증가함에 따라 온도는 전반적으로 상승하고 있음을 알 수 있다.

축 방향거리 $Z=60\text{mm}$, 80mm 인 경우 산소부화농도의 증가에 따라 노즐 중심 축 부근에서의 온도변화는 거의 없으며 반경방향으로 조금 벗어나면서 다소 증가를 보인다.

특히 축 방향거리 $Z=60\text{mm}$ 인 경우에는 노즐 중심축 근처에서 다소 낮은 온도 분포를 가지고

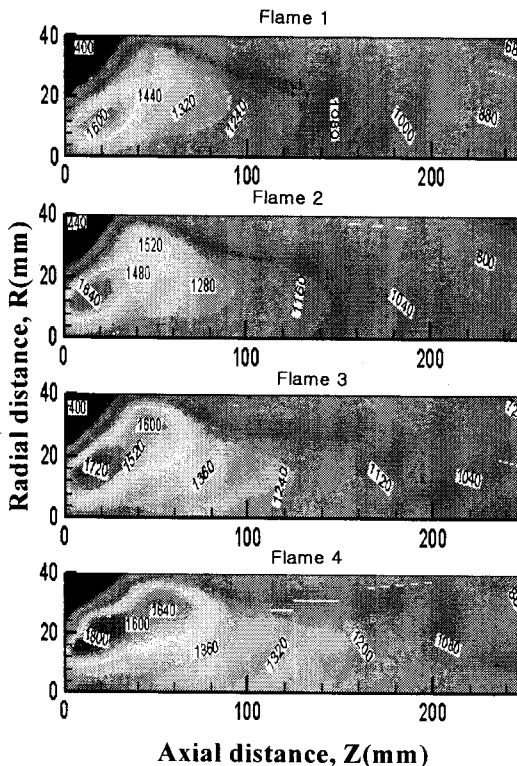
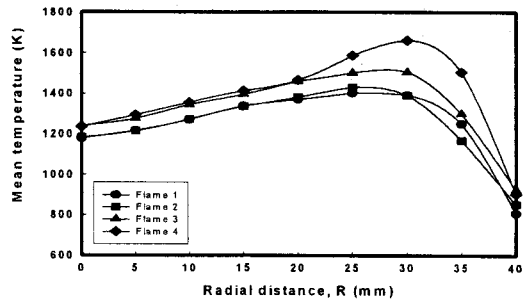
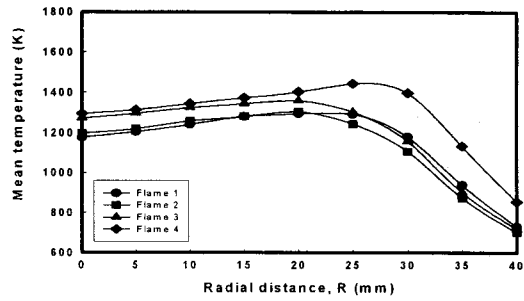


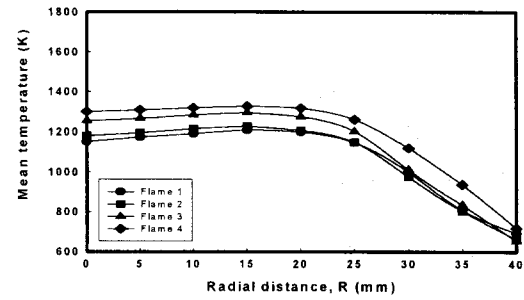
Fig. 4 Isothermal lines of the four types of flame



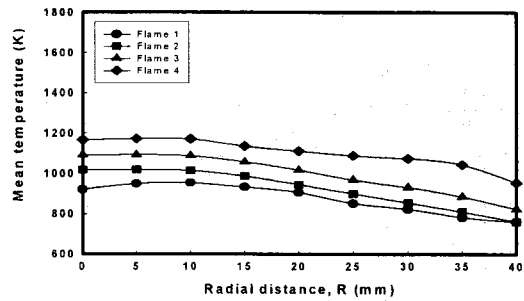
(a) $Z=60\text{mm}$



(b) $Z=80\text{mm}$



(c) $Z=100\text{mm}$



(d) $Z=200\text{mm}$

Fig. 5 Radial distributions of mean temperature for various oxygen enrichment concentration at $Z=60\text{mm}$, 80mm , 100mm , 200mm

있으나 반경 방향으로 갈수록 온도의 상승률은 커진다. 중심 축 부근에서 온도가 낮은 이유는 연료 Core와 재순환 영역에 기인한 것으로 생각된다. 또한 축 방향거리 $Z=60\text{mm}$, 80mm 인 경우에는 반경방향 $R=0\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 사이에서는 온도변화가 크지 않고, 반경방향 $R=25\text{mm}\sim 35\text{mm}$ 사이에서 온도상승이 두드러지게 나타나고 있다. 이 영역은 화염이 안정된 영역으로 이를 벗어나면서 산소농도증가에 의한 온도상승 효과는 점점 줄어든다.

또한 $Z=100\text{mm}$ 지점 이후의 하류영역에서는 산소부화농도가 증가할수록 온도분포가 높게 나타나고 비교적 균일한 온도분포가 나타나고 있는 것으로 보아서 이 부분이 화염의 끝 부분임을 알 수 있고, 화염의 끝 부분 이후에도 산소부화농도가 증가할수록 온도분포가 높게 나타남을 알 수 있다.

또한 축 방향거리 $Z=200\text{mm}$ 인 경우의 온도 변화는 화염 상류영역에 비해 상대적으로 적다. 이것으로부터 산소농도의 증가에 따른 산소부화효과는 화염의 하류보다는 상류영역에서 더 크게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 축 방향 길이에 따른 화염장내에서의 최고 온도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 산소부화농도가 증가함에 따른 화염 내에서의 최고온도는 축 방향거

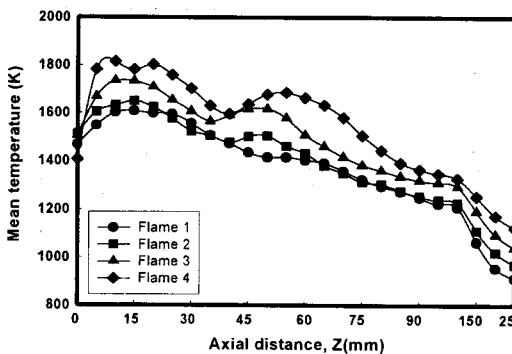


Fig. 6 Axial distributions of peak temperature for various oxygen enrichment concentrations

리 $Z=80\text{mm}$ 이내에서 두드러지게 높게 유지되고, 그 이후에서는 전반적으로 낮게 유지됨을 알 수 있다. 따라서 그 이후에는 화염이 거의 끝나는 부분임을 알 수가 있다. 이와 같이 화염 하류영역에 비해 상류영역의 온도 상승률이 큼으로써 산소농도의 증가로 인한 산소부화효과는 화염의 상류영역에서 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 화염의 최고온도는 산소부화농도 21%, 23%, 26%, 29%에 대응하여 각각 1609K, 1651K, 1736K, 1816K로 나타났으며, 이것을 온도 상승률로 나타내면 산소부화농도 21%에 대하여 각각 2.6%, 7.9%, 12.9%의 상승률을 보였다.

Fig. 7은 축방향 거리에 따른 반경방향으로 화염장내에서의 CO_2 농도분포를 나타낸 것이다. 축방향 거리 $Z=60$ 및 80mm 일 때의 CO_2 농도분포를 살펴보면 산소부화농도가 증가함에 따라 전반적으로 CO_2 농도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 산소부화농도의 증가에 따라 CO의 직접 산화반응이 촉진되어 CO농도가 감소하고, 또한 미연탄화수소의 산화 및 연소시 발생하는 OH기 및 O원자 생성의 촉진으로 산화반응이 활발해지기 때문인 것으로 생각된다.

축 방향거리 $Z=100\text{mm}$ 단면 이후의 CO_2 농도분포를 살펴보면 CO_2 농도변화는 그다지 크지 않다. 이것은 화염 하류에서의 산소농도 증가의 효과가 그렇게 크지 않음을 보여주며, 이는 앞에서의 온도에 대한 결과와 매우 유사한 것으로 생각된다.

한편, $Z=200\text{mm}$ 위치에서 반경 방향의 평균 CO_2 농도는 21%에서 2.88%인데 반해 산소부화농도 23%, 26%, 29%일때 각각 4.01%, 4.68%, 5.58%로 증가했다.

Fig. 8은 축 방향 거리에 따른 반경방향으로 화염장내에서의 CO농도 분포를 나타낸 것이다.

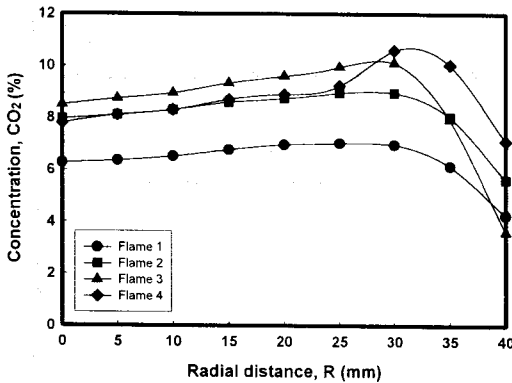
축 방향 거리 $Z=40\text{mm}$ 단면에서 반경방향으로 $R=20\sim 30\text{mm}$ 에서 CO농도가 급격하게 높게 나타나고 있는데, 이것은 아직까지 미연가스

가 재 순환 영역에 존재하기 때문으로 생각된다. 그리고 각 단면에서의 CO농도 최고점과 온도 최고점은 거의 일치하고 있다. 이것은 화염의 최고 온도점에서 연료의 열분해가 가장 활발하게 이루어지고 있기 때문이라고 생각된다. 더구나 화염의 CO농도 감소 경향과 온도변화도 거의 일치하고 있다.

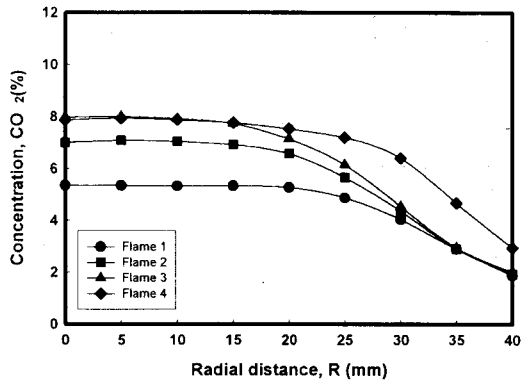
본 논문에서는 그림으로 나타나지 않았으나, 연소가 하류영역인 Z=200mm에서의 평균 CO 농도는 산소부화농도 23%, 26%, 29%일 때 산소부화농도 21%기준으로 각각 59%, 77%, 94% 감소하였다.

Fig. 9는 축 방향 거리에 따른 반경방향으로 화염장내에서의 HC농도분포를 나타낸 것이다.

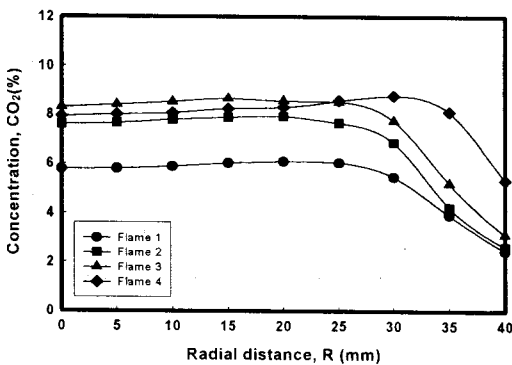
축 방향거리 Z=40mm에서 반경방향으로 R=20mm~30mm 단면에서는 HC의 농도가 급격하게 높게 나타나고 있는데 이것은 아직까지 타지 않은 연료가 재순환 영역에 존재하고 있기 때문으로 생각된다. 연소반응이 활발하다고 생각되는 축 방향거리 Z=60mm, 100mm 단면에서 중심 축으로부터 반경방향거리 R=30mm이내에서는 미소하게 검출되다가 이후부터 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 선회에 의해 활발한 연소반응을 하고 반경방향으로 갈



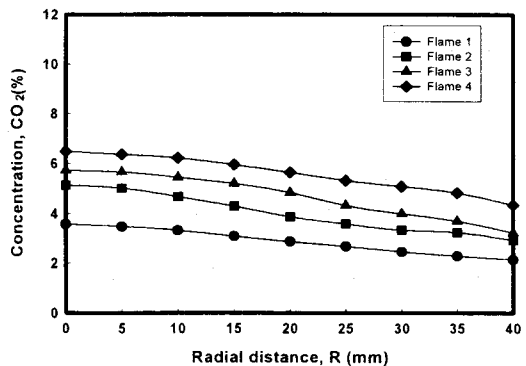
(a) Z=60mm



(c) Z=100mm



(b) Z=80mm

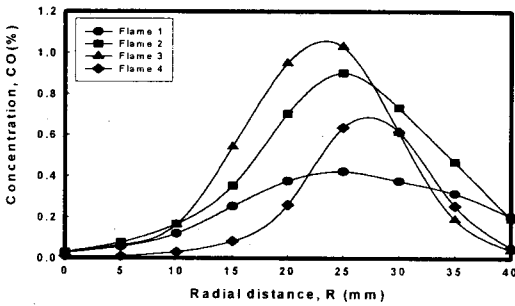


(d) Z=200mm

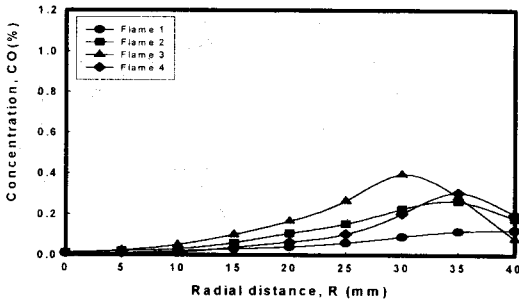
Fig. 7 Radial distributions of CO₂ concentration for various oxygen enrichment concentrations at Z=60mm, 80mm, 100mm, 200mm

수폭 반응에 참여하지 않은 공기류 속의 산소가 연소가스와 희석되어 높아진 것으로 생각된다.

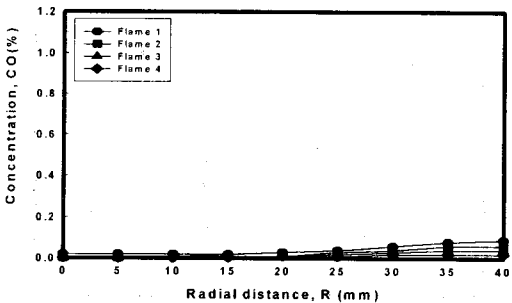
그리고 반응이 대부분 종결되었다고 생각되는 연소기 하류인 Z=200mm 단면은 산소부화농도가 증가할수록 점차적으로 HC농도가 감소하는 것으로 나타났다.



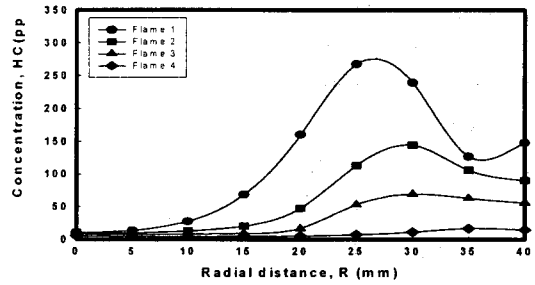
(a) Z=40mm



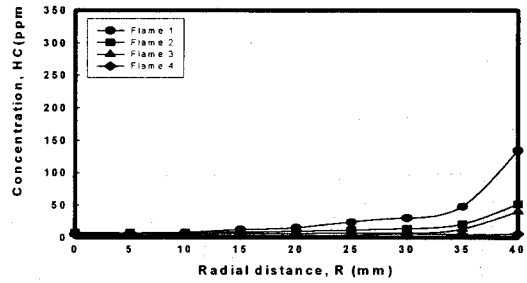
(b) Z=60mm



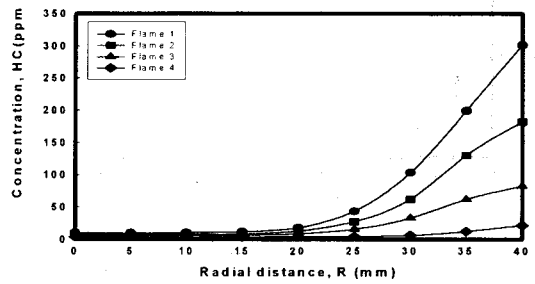
(c) Z=100mm



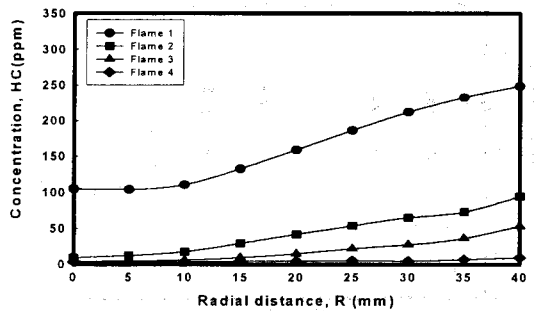
(a) Z=40mm



(b) Z=60mm



(c) Z=100mm



(d) Z=200mm

Fig. 8 Radial distributions of CO concentration for various oxygen enrichment concentrations at Z=40mm, 60mm, 100m

Fig. 9 Radial distributions of HC concentration for various oxygen enrichment concentrations at Z=40mm, 60mm, 100mm, 200mm

이것은 반응에 참여하지 않은 공기류 속의 산소농도가 높아 충분한 반응이 이루어져 낮아진 것으로 생각된다. 한편, Z=200mm 위치에서 반경방향의 평균 HC농도는 21%에서 165ppm이었으나 산소부화농도 23%, 26%, 29%로 증가했을 때의 평균 HC농도는 각각 44ppm, 20ppm, 5ppm으로 감소하여 각각 73%, 88%, 97%의 감소율을 보였다. 전반적으로 산소부화농도가 증가할수록 HC농도 분포는 반경방향으로 갈수록 저하하고 있음을 알 수 있다. 이것은 산소부화농도가 증가함에 따라 연료와 공기의 혼합촉진으로 활발한 연소반응에 의해 HC농도의 저하를 가져왔다고 생각된다. 그리고 연소기의 벽 쪽으로 갈수록 HC의 농도가 전반적으로 높게 나타나는 것은 연소기의 벽면으로의 복사열에 의한 냉각효과에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 결론

산소부화농도 변화에 따라 형성된 각각의 실험 조건에 대해 평균 온도, 연소가스 농도 등을 측정하여 연소특성을 고찰한 결론은 다음과 같다.

1) 산소부화농도가 증가함에 따라 화염장내에서의 화염길이는 거의 변화가 없으나 화염의 폭이 상류 측에는 반경방향으로 약간 줄어들고 하류 측으로 갈수록 넓어지는 경향을 띄며, 화염색깔은 발광화염 즉, 백염의 형태를 취하게 되었다.

2) 산소부화농도가 증가함에 따라 화염온도는 상승하며, 특히 노즐 상단으로부터 Z=80mm까지의 온도 상승이 현저하다. 또 산소부화농도의 증가에 따른 최고온도는 화염의 하류 쪽 보다는 상류 쪽에서의 상승률이 크며, 산소부화농도 21%에 비해 23%, 26%, 29%로 증가시켰을 때, 약 2.6%, 7.9%, 12.9%의 최고온도의 상승율을 나타내었다.

3) CO₂농도는 산소부화농도의 증가와 함께 증가하며, 연소기의 하류영역 보다는 상류영역

에서 그 증가율이 크게 나타났으며, 또한 산소부화농도가 증가하면서 CO 농도는 감소하는 경향을 가졌다. 그리고 반응이 완전히 종결되었다고 판단되는 Z=200mm에서의 반경방향 평균 CO농도는 산소부화 농도를 증가시킴에 따라 21%를 기준으로 각각 59%, 77%, 94% 감소하였으며, 평균 CO₂농도는 각각 39%, 62%, 54% 증가하였다.

4) 산소농도의 증가와 함께 HC농도는 감소하는 경향을 가지며, 특히 하류영역에서 감소현상이 두드러진다. 그리고, 연소기의 하류 영역인 Z=200mm에서의 평균 HC농도는 산소부화농도 21%에 대해 각각 73%, 88%, 97% 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 본 실험 조건범위에서는 산소 부화량이 많을수록 화염은 안정되며 연소를 촉진시키는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Brunner, C. R., "Hazardous Waste Incineration," Mcgraw-Hill Inc, 2nd edition, 1993.
2. 류호정, "화력발전소 이산화탄소 배출특성 및 회수기술," ETIS 기술분석지, 제15권, 2001.
3. Taschler, D. R. et al., "The Impact of Oxygen- Enriched Combustion of Coal Water Slurries on the Economics and Performance of Large Scale Boilers," 6th Symp(Int.) on Coal Slurry Combustion and Technology, 1984.
4. 井藤博達, 渡部正樹, 省エネルギー, Vol. 34, No. 10, 1982.
5. 코오롱 엔지니어링(주), "로타리킬른식 소각 시스템 요소기술개발," 환경부, 1997.
6. 김규성, 외 3명, "동축 확산 연소기의 화염구조와 NO_x분포에 관한 연구," 한국연소공학회지, Vol. 4, No. 2, 1999, pp. 35-41.
7. 김규성, 외 2명, "모형 가스터빈 연소기의 2차공기 주입에 따른 연소배출 특성," 한국해양공학회지, Vol. 14, No. 3, 2000, pp. 84-89.