210 大韓機械學會論文集 第8卷 第3號, pp. 210~216, 1984.

<論 文>

선회화염의 구조에 따른 NO, CO 및 THC 생성특성에 관한 연구

윤 재 건*·명 현 국**·신 현 동***

(1984년 2월 20일 접수)

A Study on the Formation Characteristics of NO, CO and THC with respect to the Structure of the Swirl Flame

Jae Kun Yoon, Hyon Kook Myong and Hyun Dong Shin

Abstract

An investigation of the effects of the size of mixing region determined by changing the position of fuel injection has been carried out. Measurements were made: the distribution of temperature and concentration profiles of the stable gas species, nitrogen oxide and total hydrocarbon in the flames. The results of this investigation show that variations of the size of mixing region produce major changes to the three type flow fields which significantly influence pollutant(NO, CO and THC) formation and energy release.

1. 서 론

실제 연소기에서는 화염길이, 안정화염 그리고 공해물질생성 등을 제어하는 수단으로써 연소기에 도입되는 공기류에 선회를 부여하고 있다. 그러나 선회난류제트의 공기역학적 특성으로 인한 선회화염의 복잡한 구조로 인하여, 상세한 해석적 연구결과는 아직 찾아볼 수 없으며, 선회류를 동반한 연소기의 설계는 주로 실험과 경험에 의존해 왔다[1].

선회화염에 대한 실험적 연구로 Kawaguchi와 Sato[2]는 예혼합선회화염에 대하여 선회도가 연소특성에 미치는 영향을 알아 보았다. Leuckel과 Fricker[3,4]는 Ijmuiden형 가변블록 버어너를 이용하여 실험한 결과, 화염선단에서 상이한 두 유동형태로부터 두 가지 안정화염형상이 형성되는 것을 발견하고, 이 두 기본적 유동형태와 이로 인한 화염형상을 선회도, 당량비 및 버어너 형상과 관련시켜 해석하였다. Nakamura 등[5]은 선회화염이 사용된 연소로내에서 2차공기의 유입에 따른 2차연소영역의 특성과 1차연소영역에 미치는 영향을 검토하였다. 이 외에도 선회화염구조에 미치는 선회도와 당량비의 영향에 관한 많은 실험적 연구가 있지만, 버어너 출구형상의 영향에 관한 체계적인 연구는 별로 수행되지 못한 상태이다. 그 이유는 버어너 출구 형상이 공기노즐에 대한 연료의 분사위치, 공기노즐의 확산도, 공기노즐과 연료노즐의 직경비에 의한 속도비의 변환 등과 같은 여러 변수들의 복합적인 형상이기 때문이다. 버어너 출구 형상이 선회화염구조에 주는 영향을 알아보기 위한 첫단계로서, 노즐형상, 유량조건 및 선회도를 고정하고 화염의 구조에 가장 크게 영향을 준다고 관찰되는 연료의 분사위치를 전체노즐구조에 대하여 상대적으로 변화시키면서 화염의 구조를 살펴보았다. 그 결과 서로 상이한 여러 형태의 안정화염이 관찰되었다.

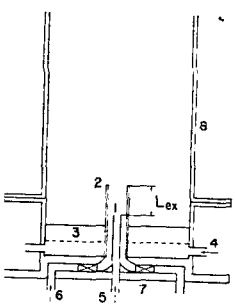
따라서 본 연구는 이러한 화염의 구조를 자세히 파악하기 위하여, 화염의 온도분포 및 가스농도분포 등을 비교적 정밀하게 측정하고 Shadow graph 등을 통하여, 선회화염의 거시적인 구조적 특성을 알아보고 일

*한국과학기술원 기계공학과
**현대중공업(주) 플랜트 제2사업본부
***정회원, 한국과학기술원 기계공학과

산화질소, 탄화수소 및 일산화탄소 등의 생성특성을 규명함으로서 실제 버어너에서의 기하학적 변형에 따른 화염구조의 예측과 수치해석을 위한 기본 데이타를 얻고, 공해물질발생과 화염구조와의 상관관계를 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 연료는 상용 프로판가스이고, 가스실린더로부터 유량측정을 위한 오리피스를 거쳐 버어너로 공급된다. 1차연소용공기는 송풍기로부터 공급되어 유량측정을 위한 오리피스를 통과하여 배분탱크에서 16가닥의 튜우브로 나뉘어져 버어너의 선회발생기로 유입된다. 그리고 노통을 씌울 경우에는 화염으로 유입되는 2차연소용 공기는 1차연소용 공기와 같은 송풍기에서 공급되어 오리피스를 거쳐 유량이 설정된 후 버어너의 2차 공기유입구로 들어간다. 본 연구에서 사용된 버어너의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다.



1. Fuel nozzle exit (O.D. 6mm, I.D. 5.7mm)
2. Air nozzle exit (O.D. 35mm. I.D. 30.5mm)
3. Glass ball layer
4. Secondary air inlet
5. Fuel inlet
6. Primary air inlet
7. Swirl generator
8. Furnace wall

Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental apparatus

선회발생방법은 선회도를 연속적으로 조절할 수 있고, 또 강선회인 경우 선회발생기에서의 압력강하가 비교적 작은 가변블록형 선회발생기[3]를 사용하였다. 1차연소용공기는 공기유입구 ⑥을 통하여 선회발생기 ⑦을 거쳐 1차공기출구 ②로 나오게 된다. 실험은 노통 ⑧을 제거하고 연료와 1차연소용 공기만을 공급하여 행하고, 화염의 질소산화물생성총량의 측정시에만 노통 ⑧을 설치하고, 화염의 형상이 노통 설치전과 비교하여 외관상 변하지 않도록 2차연소용 공기를 공기유입구 ④로부터 유리구슬층 ③을 통과시켜 정류된 2차공기를 공급하여, 길이 1.2m의 노통출구에서 질소산화물의 농도를 측정하였다. 연료노즐분사위치는 연료노즐 ①로부터 공기노즐출구 ②까지의 거리 L_{ex}로 결정하였는데, 분사위치의 변화는 연료노즐 ①은 고정시키고, 12가지의 서로 다른 길이를 갖는 공기노즐을 바꾸어 설치하여 변화시켰다. 공기노즐 ②는 노즐내에서 존재하는 화염의 형상을 확인하기 위하여 내경 30mm의 파이렉스유리로 제작하였다. 본 실험에서는 연료의 유량은 15l/min. 으로 고정시키고 당량비는 0.8이 되도록 1차연소용 공기를 공급하고, 선회도는 버어너 노즐출구에서 각 운동량의 축방향의 유속(flux)과 정압항이 생략된 선형운동량의 축방향의 유속(flux)의 비로 정의되는데, 본 실험에서는 2.06으로 고정하였다. 결국 변화시킨 것은 연료노즐 선단으로부터 공기 노즐출구까지의 거리 L_{ex}인데, 전형적인 화염의 형태에 대한 L_{ex}의 크기는 공기 노즐 출구의 직경 D를 사용하여 Table 1에 나와 있다.

Table 1 Typical flame conditions

Flame type	L_{ex}/D	
Type **I**	0	Fuel flow rate=15l/min.
Type **O**	0.5	Equivalence ratio=0.8
Type **V**	1.5	Swirl number=2.06

시간평균온도는 선경(wire diameter)이 0.1mm인 $Pt-Pt$/13%Rh 열전대 프로우브를 제작하여, 측정부에는 연소가스에 의한 촉매반응 효과를 줄이기 위하여 산화마그네슘(MgO) 피막을 입히고, 디지탈온도계를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 복사열전달에 대한 측정온도의 보정은 하지 않았다. 화염내의 국소가스농도 측정은 직경 0.3mm의 석영튜우브로부터 채취된 시료가스가 직경 5mm로 팽창함으로써 공기역학적으로 연소반응이 동결되는 프로우브를 제작하여 측정하였다[6]. 질소산화물을 제외한 가스농도분석은 가스크로마토그라프(HP—5730A)를 사용하였다. H_2, O_2, CO 및 CO_2의 안정한 가스농도는 채취된 시료가스를 직경 3.175 mm, 길이는 2m의 carbosieve S(80/100mesh)를 충진한 스테인레스 스틸 분리관을 통과시켜 열전도율 검출기(thermal conductivity detector)로 측정하여, 표준가스를 이용하여 검정하였다. CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_8 등의 각종 탄화수소의 농도는 직경은 3.175 mm이고 길이는 40cm 정도의 carbosieve를 충진한 스테인레스 스틸 분리관을 사용하여 화염이온화 검출기(flame ionization detector)로 측정한 뒤 표준가스로 검정하였다. 가스크로마토그라프의 운반가스유량조건 및 분리관의 온도프로그래밍은 Table 2에 자세히 나

Table 2 Gas chromatograph operation conditions

Detecting gas	H_2, O_2, N_2, CO, CO_2	$CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_8$
Detector	T.C.D.	F.I.D.
Column	SS 2m×3.175mmϕ with carbosieve S (80/100mesh)	SS 0.4m×3.175mmϕ with carbosieve S (80/100mesh)
Carrier gas	He, 30m*l*/min.	N_2, 40m*l*/min.
Temperature programming	50°C(4min.) 32°C/min 180°C(Hold)	220°C(2min.) 32°C/min. 250°C(Hold)

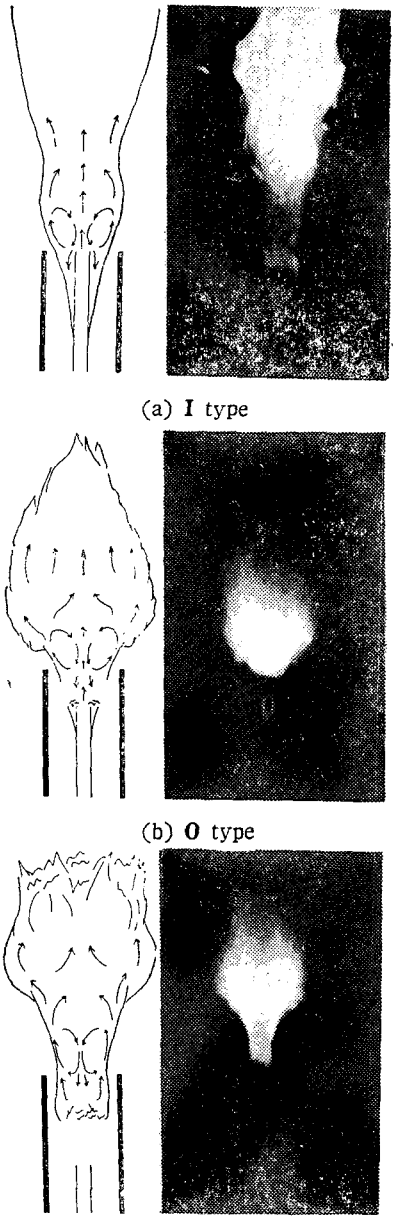
와 있다. 일산화질소(NO) 및 질소산화물(NO_x)의 농도측정은 화학발광법식 NO/NO_x 분석기(Thermo-Electron Co. Model-10AR)를 사용하였다. 모든 농도의 측정값은 시료가스에서 H_2O를 모두 제거하고 분석기에 주입하기 때문에 측정치는 건농도(dry-basis)이다. H_2O를 포함한 습농도(wet-basis)로의 환산은 C, H, O, N 원자의 보존식으로부터 모든 가스의 확산속도는 같다는 가정하에, O와 N의 비율이 항상 일정하다는 것을 이용하여 계산하였다[7]. 연료와 공기의 혼합정도를 알 수 있는 국소당량비는 측정된 가스농도로부터 원자의 보존식을 이용하여 연료인 프로판과 공기의 양을 역산하여 계산하였다. Shadow graph는 직경 20 cm의 오목면경과 광원으로는 할로겐램프(1000W)를 사용하여, 셔터속도 1/1000초로 촬영하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 선회화염의 구분

화염의 모양은 1차연소용 공기의 선회도, 당량비 및 버어너의 기하학적 조건과 유량조건이 정해져 있을 때, 연료분사 위치에 따른 화염구조의 규명에 있으므로, 1차공기 노즐 출구 단면에서 연료분사노즐 출구까지의 거리 L_{ex}를 변화시키면서 화염의 외적 변화를 조사하였다.

Fig. 2는 L_{ex}의 변화에 따른 대표적인 화염의 모습을 묘사한 것이다. 1차공기 출구와 연료분사 노즐 출구가 같은 평면($L_{ex}=0$)일 때는, 1차공기출구(노즐출구로 이후에 표시)로 부터의 거리 $L\fallingdotseq 1.5D$(D는 공기노즐직경)까지는 휘염(luminous flame)이 약간 섞인 재순환 영역이 존재하는 부분이고, 그 이후는 순수한 파란 화염층이 있고, 다시 휘염이 아주 많은 긴 화염



(a) **I** type

(b) **O** type

(c) **V** type

Fig. 2 Schematic diagrams and photographs of the typical flames

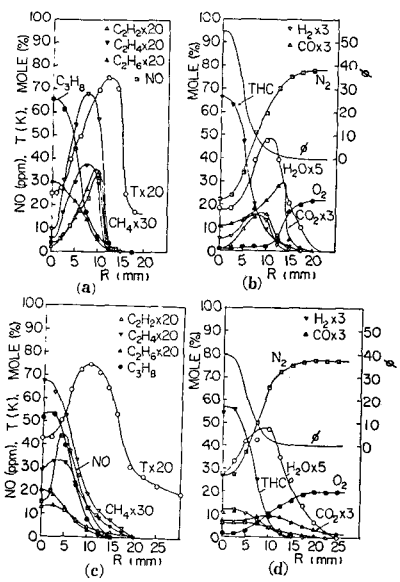
이 형성된다. 이 화염을 본 실험에서는 **I**형이라 칭하기로 한다. 그리고 노즐 출구로부터 연료분사 위치를 변화시키면 Fig. 2(b)에 나타나듯이 휘염은 거의 보이지 않으며 **O**형의 화염이 형성되는데, 이 화염은 공간적으로 불안정한 화염이다. 더욱더 연료분사위치를 낮게 하면 Fig. 2(c)에 나타나듯이 휘염이 전혀없는 **V**형의

안정한 화염이 형성된다.

본 논문에서는 I형, O형 그리고 V형의 구조에 대하여 각각 조사하였으나, 대표적으로 I형, V형에 관한 데이타를 제시하여 설명하기로 한다.

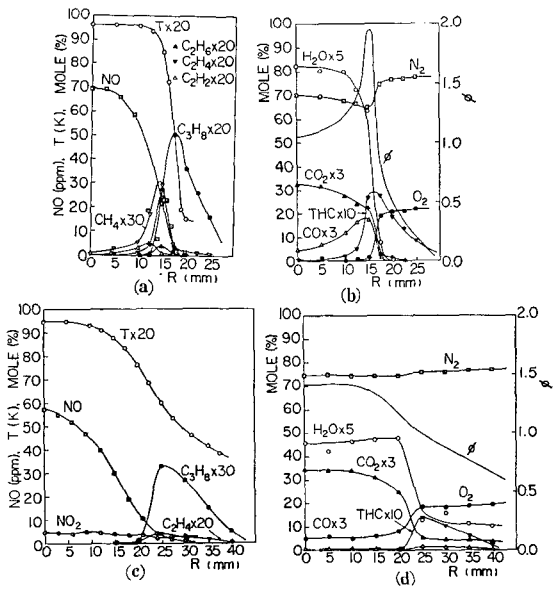
3.2. 화염구조의 해석

Fig. 3은 I형 화염의 대표적 단면, 즉 1차공기 출구로부터의 거리 L이 20mm, 40mm에서의 각종 온도, 농도 및 국소당량비의 분포를 나타낸 것이다. 전탄화수소(THC)의 분포는 C의 원자의 수가 3일 경우를 1로 정하여 평중을 취한 후 합산하여 구하였다. Fig. 3(a)(b)는 L=20mm 단면분포인데, 국소당량비 ϕ가 중심부에 상당히 높으며, 산소와 질소의 농도 및 온도는 비교적 낮다. 그리고 분류 중심에서부터의 반경방향의 거리 R=12~13mm 근처에 온도가 그 최고점을 나타내며, 연소생성물인 CO_2의 농도의 최고점이 존재하는 것으로부터 이 근처가 주된 화염이 존재하는 영역으로 간주된다. 탄화수소의 분포를 보면 R=12~13mm 안쪽에서 열분해를 일으켜서 C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, CH_4 및 H_2로 변한 후, 국소당량비 ϕ=1(R=12~13mm)로 연소함을 알 수 있다. 한편, 이 영역은 재순환 영역이 존재하는 곳이지만, 중심부의 연소생성물인 H_2O, CO_2의 농도가 낮은 것과 ϕ의 값이 너무 큰 것으로 보아 노즐로부터 나온 연료가 그대로 수직상방으로 그 세력을 보유하고 있다. Fig. 3 (c)(d)는 L=40mm 단면분포를 제시한 것이다. R=10 mm 근처에, 연소생성물 H_2O, CO_2의 최고점이 있는 것과 최고 온도가 됨을 미루어 주된 화염면이 있음을 알 수 있다. 또한 R=10mm 근처는 ϕ=1이며 안쪽에서의 ϕ의 값이 여전히 높은 점으로 보아 연료노즐로부터의 연료가 재순환 영역을 꿰뚫고 있다. 이와 같은 현상은 후술하는 Shadow graph로부터 확인할 수 있다. 그리고 화염의 폭은 L=20mm 보다 다소 줄어든 곳에 위치하고 있다. Fig. 3(a), (b), (c), (d) 그리고 후술할 Shadow graph로부터 다음과 같은 화염구조를 알 수 있다. L=50mm 근처까지 재순환 영역이 존재하나, 연료노즐로부터 분출된 연료가 이 재순환 영역을 관통하여 그 이후는 재순환 영역이 없는 순수한 분



(a) Nitric oxide, hydrocarbons and temperature at L=20mm
(b) Stable gases and total hydrocarbon at L=20mm
(c) Nitric oxide, hydrocarbons and temperature at L=40mm
(d) Stable gases and total hydrocarbon at L=40mm

Fig. 3 Radial distributions of temperature and gas concentrations of the I type flame at L=20mm & L=40mm



(a) Nitric oxide, hydrocarbons and temperature at L=20mm
(b) Stable gases and total hydrocarbon at L=20mm
(c) Nitric oxide, hydrocarbons and temperature at L=40mm
(d) Stable gases and total hydrocarbon at L=40mm

Fig. 4 Radial distributions of temperature and gas concentrations of the V type flame at L=20mm & L=40mm

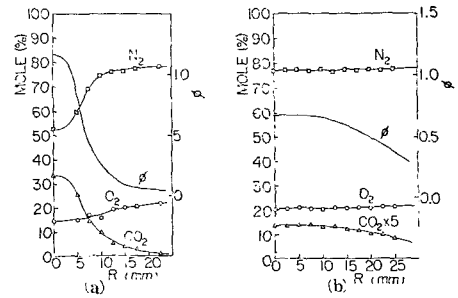
류화염에 가까운 화염으로 변한다.

Fig. 4는 V형 화염의 L=20mm 단면과 L=40mm 단면에서의 각종 농도, 온도 및 국소당량비의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 4(a), (b)는 L=20mm 단면의 분포를 나타내는 것으로, R=17mm 근처에서 ϕ의 값이 그 최고점을 가지며 전탄화수소(THC)의 농도가 또한 최고점을 나타낸다. 즉 연료과잉영역이 화염외곽에 존재한다. 그리고 R=17mm에서의 THC의 대부분이 C_3H_8이고, 이 지점보다 외곽에서는 비교적 많은 양의 탄화수소가 존재하지만, ϕ의 값이 급격히 떨어져서 희석 되어감을 알 수 있다. 즉 이 단면에서는 노즐에서 분출된 연료가 그대로 재순환 영역에 밀려서 R=17mm 근처에 다량 존재하면서 주위공기와 연소반응없이 혼합되어 가고 있다. 그러나 이 단면에서는 중심부에 많은 연소생성물, H_2O와 CO_2가 존재하는 것과 $\phi \geqq 1$이므로, 활발한 연소반응이 일어나는 재순환 영역이다. Fig. 4(c), (d)는 L=40mm 단면에서의 분포를 나타낸다. 단면전체를 통하여 ϕ는 1.5이하로 비교적 작은 값을 가지며, 탄화수소의 양이 상당히 작다. Fig. 4 (a), (b), (c), (d)로부터 다음과 같은 화염구조를 설명할 수 있다. 연료노즐로부터 분출된 연료는 재순환 영역에 밀려 외곽으로 퍼지게 되어 노즐 가까이에서는 주위공기와 연소반응이 거의 없이 혼합되면서 하류로 흘러가게 된다. 한편 주위에서 혼합된 연료와 공기의 대부분은 재순환 영역으로 들어가서 연소에 가담하나, 일부는 너무 ϕ가 낮아져서 외부로 배출될 가능성이 크다.

3.3. 연소반응이 없는 흐름장에서의 혼합특성

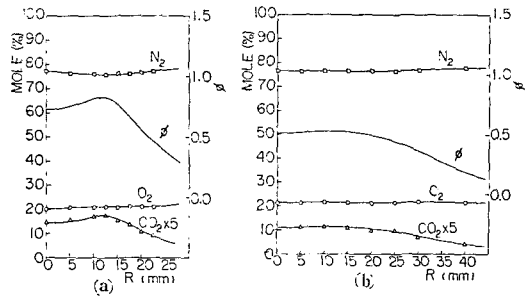
본 연구에서는 앞에서 제시한 두 종류의 대표적인 화염의 유량조건과 유사한 연소반응이 없는 흐름장에 대한 혼합특성을 규명하기 위하여, C_3H_8과 유사한 분자량을 갖는 CO_2를 상기 화염의 경우와 같은 노즐에 연료대신 사용하여 어떠한 혼합특성이 있는가를 조사한 후, 연소반응이 혼합특성에 미치는 영향을 검토한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 I형 및 V형에 각각 해당되는 유량조건에 대한 대표적인 단면에서의 농도분포를 나타낸 것이다. 실선으로 표시된 ϕ는 CO_2와 같은 C_3H_8의 체적유량일 경우 혼합정도를 나타내기 위한 지표로서 국소당량비를 계산하여 표시한 것이다. Fig. 5(a)로부터 I형분류는 화염이 있을 경우와 같이 중심부에 CO_2의 농도가 상당히 크게 존재하고, 또 ϕ의 값이 큰 것으로 보아 재순환 영역을 연료노출로 부터의 연료가 관통하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 L=40



(a) at L=20mm, (b) at L=40mm

Fig. 5 Radial distributions of gas concentrations of the I type cold jet



(a) at L=20mm, (b) at L=40mm

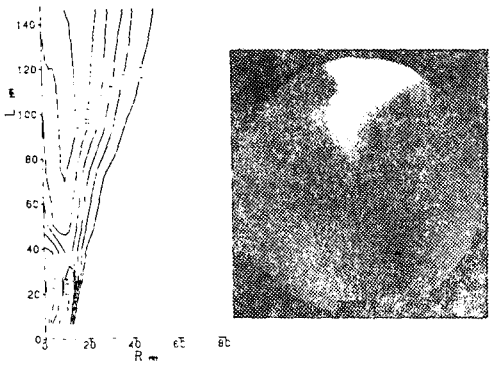
Fig. 6 Radial distributions of gas concentrations of the V type cold jet

mm 단면(Fig. 5(b))의 ϕ는 0.5 근처의 값을 갖게 되어 주위공기류와의 혼합이 화염이 있을 경우보다 훨씬 활발히 이루어진다. Fig. 6에서도 Fig. 4와 비교하면 공기와의 혼합특성이 연소가 없을 경우 훨씬 빠름을 예측할 수 있다.

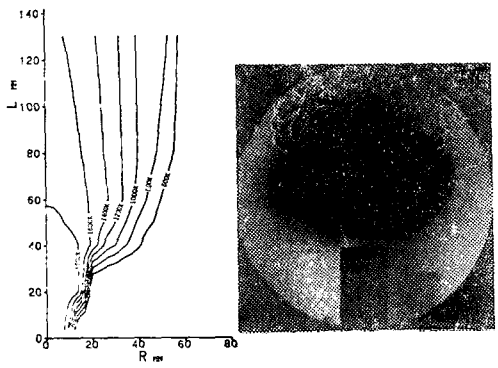
3.4. NO 생성특성

Fig. 3과 Fig. 4로부터, I형 화염과 V형 화염의 재순환 영역이 있는 곳에서의 일산화질소생성 특성을 비교하여 보면 다음과 같다. I형 화염(Fig. 3(b), (d))에서는 L=20mm, 40mm 단면의 전체를 통하여 최고농도가 40ppm 정도이나, 이 양단면에서의 일산화질소는 그 최고농도의 위치가 최고온도위치보다 안쪽에 위치하고 있다. 이것은 전체적으로 온도가 낮은 것으로 미루어보아 오히려 하류에서 생성된 NO가 역류되어 분포된 것으로 사료된다. 한편 V형 화염의 경우는 재순환 영역에 제한하는 한, Fig. 4로부터 전체적으로 I형 보다 많은 NO가 생성됨을 알 수 있다.

Fig. 7(a), (b)는 I형과 V형의 두 화염형태에 대한 전체적인 등온선과 Shadow graph를 각각 대응시킨 것으로, I형화염은 농도분포로부터 유추된 것과 같이



(a) I type



(b) V type

Fig. 7 Shadowgraphs and isothermal lines of the typical flames

L=50mm 근처까지 중심부에 연료의 분류로 보이는 부분이 재순환 영역을 관통하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 V형 화염은 중심부에 연료의 분류는 보이지 않는다. 그리고 I형 화염의 온도분포를 보면 노즐 가까운 영역에서는 비교적 낮은 온도분포를 나타내며, 재순환 영역이 끝난, L=50mm 이후에 고온의 영역이 상당히 넓은 범위로 존재한다. L=50mm 이후는 재순환 영역 없이 자유분류의 형태로 주위공기와 혼합, 연소하므로 화염길이가 상당히 길어지며, 그로 인하여 연료과잉 영역이 커지므로 매연의 발생속도가 크게 되는 휘염으로 된다. 그러나 V형 화염의 온도분포를 보면 L=50 mm 근처 즉 재순환 영역에 상당히 고온부가 존재하며 하류로 가면서 온도가 급강하한다.

본 연구는 I형과 V형의 화염의 전체적인 NO 생성량을 비교하기 위하여, 외형적인 화염의 형태가 변하지 않도록 2차공기를 공급하면서, 연소기를 직경 50cm인 파이프로 에워싸서 그 출구에서 NO 농도를 측정하여 비교하였다. 그 결과는 Table 3에 나타낸다. 즉 I형의 경우가 V형에 비하여 훨씬 많은 NO 및 NO_x를 배출한다. 그 원인은 Fig. 7로부터 알 수 있듯이, 재순환 영역에서는 I형의 NO_x생성속도가 V형에 비하여 지극히 작지만 하류에서 자유분류형태로 연소하여 넓은 영역에서 NO_x가 생성됨으로, 전체적으로는 I형이 V형보다 많은 양의 NO_x를 배출한다.

Table 3 Concentrations of the nitrogen oxide at the furnace exit

Flame type	NO ppm	NO_x ppm
Type I	1.0	18.0
Type O	0.6	9.6
Type V	0.4	8.4

4. 결 론

버어너 출구 형상은 선회도와 당량비와 더불어 선회화염의 구조에 큰 영향을 준다. 이러한 버어너 출구 형상은 여러 변수들의 복합적인 현상으로 나타지만, 이 변수들 중에서 화염구조에 가장 크게 영향을 준다고 관찰된 연료분사위치에 따른 화염구조를 규명하기 위하여 특히 재순환 영역에 주목하여 대표적인 단면에서, 각종 농도, 온도 그리고 국소당량비를 측정함과 동시에 사진관찰을 통하여 다음과 같을 결과를 얻었다

(1) 공기노즐 내에서의 연료분사 위치에 따라서 강한 선회의 안정화염은 크게 두 가지의 형태로 분류할 수 있으며, 각 화염의 형태는 중심 연료 제트가 재순환 영역을 관통하느냐 못하느냐에 의해서 결정된다.

(2) 공기노즐 출구와 연료노즐 출구가 같은 단면일 경우 형성되는 I형 화염은 재순환 영역의 중앙부를 연료가 관통하여 재순환부의 체적이 아주 작아지며, 이 영역에서 연소하지 못한 대부분의 연료는 L=50mm 이후에서 자유분류의 형태로 연소한다.

(3) 공기노즐 돌출길이 L_{ex}가 1.5D 이상일 때 형성되는 V형 화염의 경우 대부분의 연소는 재순환 영역에서 일어난다. 그러나 노즐 가까운 단면에서는 연료가 재순환 영역에 밀려 외곽으로 분포하게 되며 이 연료는 주위공기와 연소반응없이 혼합되면서 희석된다. 따라서 미연소된 탄화수소를 많이 배출할 가능성이 크다.

(4) NO_x 생성은 I형보다 V형의 경우가 전체적으로 생성량이 적다. 그 원인은 I형이 V형보다 고온영역이 넓게 존재하기 때문이다.

후 기

본 연구의 가스농도측정 방법에 대하여, 많은 조언을 통하여 도와주신 한국과학기술원 화학과 정경훈 교수께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

(1) N. Syred and J.M. Beer, "Combustion in Swirling Flows; A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143~201, 1974

(2) O. Kawaguchi and G.T. Sato, "Experimental Investigation of Premixed Swirling Jet Flames", Bulletin of JSME, Vol. 16, No. 95, pp. 851~861, 1973

(3) W. Leuckel and N. Fricker, "The Characteristics of Swirl Stabilized Natural Gas Flames, Part I; Different Flame Types and Their Relations to Flow and Mixing Patterns", J. Inst. Fuel, Vol. 49, June, pp. 103~112, 1976

(4) W. Leuckel and N. Fricker, "The Characteristics of Swirl Stabilized Natural Gas Flames, Part II; The Effect of Swirl and Burner Mouth Geometry on Flame Stability", J. Inst. Fuel, Vol. 49, Sep., pp. 152~158, 1976

(5) S. Nakamura, O. Kawaguchi and G.T. Sato, 連續流燃燒器內への二次空氣の流入とその燃燒狀態への影響, 日本機械學會誌(B編), 第49卷 第439號, 1983

(6) R.M. Fristrom and A.A. Westenberg, "Flame Structure", Chap. XI, pp. 180~183, McGrawHill, New York, 1965

(7) F.A. Williams, "Combustion Theory", Chap. 1, pp. 2~13, Addison-Wesley, Reading, 1965

(8) 윤재건, "선회화염의 일산화 질소 생성에 관한 실험적 연구" MS Thesis, KAIST, 1983