선회도가 평면화염버너의 유동과 연소 특성에 미치는 영향

정용기* · 김경천** · 전충환** · 장영준†

2001년 8월 25일 접수, 2001년 12월 12일 심사완료)

The Effect of Swirl Intensity on Flow and Combustion Characteristics of Flat Flame Burner

Yong-Ki Jeong, Kyung-Chun Kim, Chung-Hwan Jeon and Young-June Chang

Key Words: Flat Flame Burner(평면 화염 버너), Recirculation Zone(재순환 영역), PIV(Particle Image Velocity), Swirl Number(선회도), Damkohler Number

Abstract

In this study, the flow and combustion characteristics of flat flame burner with swirler were investigated. There are several factors that define the characteristics of burner. Among them, the experiments was focused on swirl effect by four types of swirler in terms of flow structure, distribution of temperature and emission characteristics. In PIV(Particle Image Velocimetry) experiment, the less of swirl number, axial flow is dominant at the center. As swirl number increases, the flow develops along the burner tile and backward flow becomes stronger at center. From the combustion characteristics, as long as combustion load increases, blow-off limit was improved. But at the higher swirl number, the limit is decreased. At swirl number 0, the temperature is shown typical distribution of long flame burner. but swirl number increases, the temperature distribution is uniform in front of round tile. Therefore, the temperature distribution is coincided with flow structure. As excess air ratio increases, NO concentrations are high. But high swirl number gives rise to become low NO concentrations. The flame characteristics are comprised in wrinkled laminar-flame regime according to turbulence Reynolds number(Re_T) and Damkohler number(Da).

기호설명

D	: 버너 스롯 지름
Da	: Damkholer number
Re	: 레이놀즈수
Re_T	: 난류레이놀즈수
S	: 선회도
S_L	: 층류화염 속도
u	: 반경방향 속도
U	: 반경방향 평균속도
Uavg	: 버너 스롯 속도
v'rms	: 난류강도
V	: 축방향 평균속도
ν_b	: 동점성계수

그리스문자

δ_L	: 층류화염두께
λ	: 과잉공기비

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail : changyj@hyowon.cc.pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

1. 서 론

최근 에너지 동력 기계분야에서는 연소기의 효율 향상을 통한 에너지 절감과 공해 물질의 배출 저감을 위해 고성능, 저공해 청정 연소기술의 개발이 중요한 연구과제로 대두되고 있다. 에너지 절약형 연소기술로는 고복사 연소, 축열 연소, 촉매 연소 그리고 산소부하 연소기술등이 있으며, 이들 중 고복사 연소는 적열된 버너의 표면 및

노 벽면으로부터 방출되는 높은 복사에너지를 이용하여 노 온도가 유지되는 연소로에 있어서 피열체에 신속한 열전달과 균일 가열이 가능하다. 특히 연소공기의 선회유동을 이용한 난류분류확산화염을 가지는 평면 화염 버너는 연료와 공기 혼합가스에 강한 선회력을 수반함으로 중심축상에 넓은 재순환 유동을 발생시키고, 이로 인해 고온의 연소가스가 역류함으로서 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 넓은 연소 범위에 걸쳐서 안정된 고부하 연소가 가능하다.[1] 또한 화염 면적이 증가하여 화염온도가 낮아지고, 연소가스의 재순환으로 산소 농도가 낮아져 NOx가 저감되는 효과로 인해 평면 화염 선회 연소기의 활용도가 점점 높아지고 있는 실정이다.[2]

선회 유동을 이용한 평면 화염 버너의 연소특성 즉, 화염의 형상, 안정성, 온도 분포 및 배출가스 특성은 버너의 기하학적 구조와 연료 및 산화제의 유동 특성에 따라 상당한 영향을 받게 된다. 이와 관련한 실험적, 이론적 연구가 활발히 진행되고 있고, 흥미 있는 연구 결과가 계속 발표되고 있다.

Mathur, Maccallum 등은 3차원 구형피토관을 사용하여 3차원 난류유동장을 측정하였으며 강선회류는 연소실 중앙부에 재순환영역을 발생시킴을 확인하였다.[3,4] Lee 등은 고부하 연소기의 유동장 특성에 관한 연구에서 연소실 팽창각에 따른 유동 특성과 선회도의 증가에 따른 재순환 영역의 축방향의 속도가 증가하는 것을 관찰하였다.[5] Chigier와 Yule은 프로판과 공기의 전단층에 형성되는 분류확산 화염에 관한 연구에서, 혼합영역내에서 와류링이 형성되어 난류 혼합을 촉진시키고 있음을 확인하였다.[6] Yamaguchi 등은 평면 전단류중에 형성되는 난류확산 화염을 대상으로 실험과 수치계산을 통해 코히어런트 구조와 난류 확산 기구를 조사하였다.[7]

현재까지 선회도와 그에 따른 재순환영역에 대한 연구는 많이 이루어져 있지만, 유동의 흐름을 교란할 여지가 있는 피토관을 이용한 연구나 LDV에 의한 국소 유동장에 대한 연구, 또는 smoke 가시화를 통한 정성적 유동 패턴이 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 강선회를 수반한 확대 유도관 방식의 고부하 평면 화염 연소기의 비연소 유동장의 정량적 해석을 위해, PIV기법으로 전체 유동장의 유동 패턴과 유동장내의 정량적인 데이타를 얻었고, 각 선회도 별로 화염 형상, 화염 안정성, 온도 특성 및 배출가스 발생 특성을 비교 실험하고, 그 결과를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 평면화염 연소기로서 버너 스롯 부분에서 점차적으로 직경이 확대되는 방사형 모양을 취하고 있다. 방사형으로 확대된 전면부 직경은 246mm, 버너 스롯 직경은 34mm, 스롯 직관부 길이는 65mm, 곡률 반경은 56mm이다. 본 실험에서는 베인 형태의 축방향 선회기를 사용하였으며, 선회도(S)는 무차원수로서 분류내의 각 운동량을 노즐 반경과 축방향 운동량을 곱해 나눈값으로 다음의 값으로 정의하였다.[8]

$$\text{선회도}(S) = \left(\frac{2\tan\theta}{3}\right)\frac{(1-\sigma_r^3)}{(1-\sigma_r^2)} \qquad (1)$$

여기서, σ_r은 선회기의 내경과 외경의 직경비이며, θ는 선회각도이다. 선회기는 각도가 0° , 20° , 40° , 60° 인 경우, 즉 선회도는 각각 0, 0.26, 0.6, 1.24인 노즐을 사용하였다.

Table 1은 PIV 계측을 통한 유동특성과 연소특성을 파악하기 위한 실험조건이다. 유동특성 실험에서는 공기의 유량을 48 ℓ/min로 고정하고,

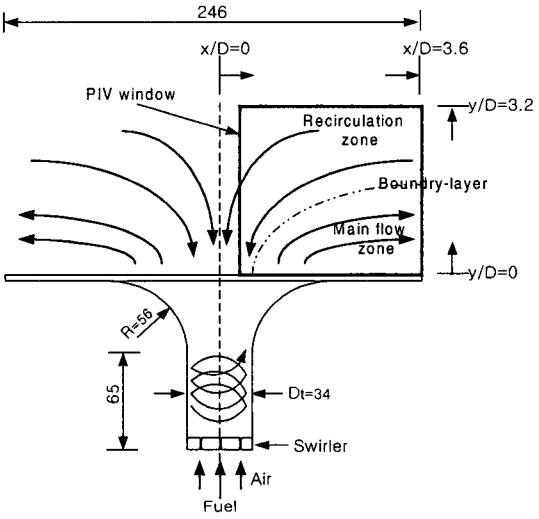


Fig. 1 Schematic of test section of combustor

Table 1 Operating conditions for flow and combustion experiments

	PIV	Combustion		
	Velocity	Blow-off	Temperature	NO
Combustion Load (kcal/hr)	2600 (48 ℓ/min)	2600, 3900, 5200, 6500	2600	2600
Air Excess Ratio (λ)	1.0	1.0	1.2	0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3
Swirl Number(S)	0, 0.26, 0.6, 1.24			

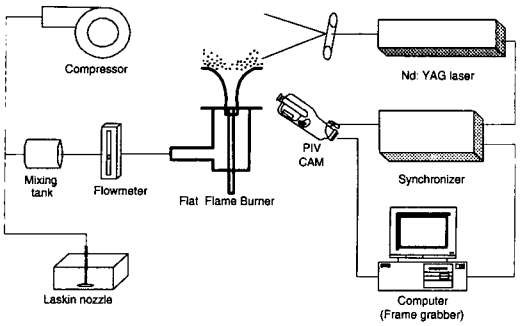


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus using PIV method

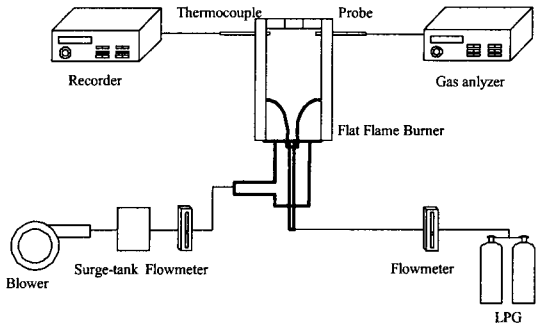


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for combustion

각 선회도에 따른 유동 특성을 파악하였다. 연소 특성 실험에서는 각 선회도에 따른 blow-off 특성을 알아보기 위해 과잉공기비를 일정하게 한 후 연소부하율을 변경하였고, NO는 과잉공기비에 따라서 측정하였다.

2.1 PIV 유동실험

Fig. 2는 평면 화염 버너(Flat Flame Burner)의 선회도에 따른 확대관 전면부의 유동장을 측정하기 위한 실험장치도이다.

버너의 유입유량은 48 ℓ/min로 실연소시 2600kcal/h에 해당하고, 노즐의 분사속도는 15.5m/s로 레이놀즈수는 2000이다. 평면화염을 구현하기 위해 선회도를 0, 0.26, 0.6, 1.24로 변화시켜 유동장의 특성 파악을 위한 PIV 시스템은 532nm의 파장을 갖는 Nd : YAG레이저, CCD 카메라를 사용하였다. 공급된 입자는 비교적 공기의 흐름을 잘 추종하는 올리브 오일을 사용하였다. 속도벡터의 계산은 2프레임 상호상관 PIV기법을 이용하였다.[9~12] 이때, 두 프레임 사이의 간격은 160μs로 일정하게 하고, 탐색영역의 크기는 24×24픽셀로 50%의 겹침을 허용하였다. 각 선회도에 따라 1000장의 화상을 취득하고, 속도장 500장을 획득하여 앙상블 평균하였다.

각 선회도가 유동장에 미치는 영향을 알아보기 위해 유선분포를 확인하였고, 속도 분포 및 재순환 유동의 형태를 파악하기 위해 반경 및 축방향으로 4개의 상대 위치(x/D, y/D)를 설정하여 각각의 무차원 속도를 확인하였다.

2.2 연소 실험

Fig. 3은 선회도에 따른 연소 특성을 파악하기 위한 실험장치도이다. 버너는 고온에 견딜 수 있도록 100mm 두께의 내화 및 내열재질로 단열된 연소로 안에 설치하였다. 온도 측정은 R-type 열전대를 사용하였고, NO 분석을 위해 전기화학센서가 장착된 가스 분석기(KM-9106)를 사용하였다. 사용연료는 LPG로서 저위발열량은 21,790kcal/Nm³이다.

화염의 blow-off 특성은 대기조건과 연소로 조건에서 연소부하별로 과잉공기비 1.0에서 각 선

회도에 따라 실험 하였고, 연소용 공기는 대기온도의 공기를 사용하였다. Blow-off 한계 속도는 부하량 조건에서 화염이 blow-off 될 때의 버너 스롯의 출구 공기 속도로 규정하였다.

온도특성 실험은 대기공기가 연소장내에 유입되지 않는 단열 연소로내에서 버너 스롯의 축방향으로 30mm 지점, 반경방향으로 0, 20, 40, 60, 80, 100mm의 6지점을 각 선회도별로 R-Type(백금-로듐) 열전대를 이용하여 온도측정을 하였다.

화염특성을 평가하기 위해 화학반응률과 유체 혼합률의 비를 나타내는 Damkohler number(Da)와 난류레이놀즈수(Re_T)를 산출하였다. Da와 Re_T 다음과 같이 정의한다.[13]

$$Da = \frac{l_0/\nu'_{rms}}{\delta_L/S_L} \quad (2)$$

$$Re_T = \nu'_{rms}\, l_0/\nu_b \quad (3)$$

여기서 l_0는 적분길이 스케일, ν'_{rms}는 난류강도, δ_L는 층류화염두께, S_L는 층류화염속도, ν_b는 동점성계수를 나타낸다.

선회도와 과잉공기비에 따른 NO의 발생특성은 가스 분석기를 통해 파악하였다. 이때 단열 연소로의 내부 온도는 650℃로 유지하였다. 결과치는 기준산소농도 3%로 환산하여 나타내었다. 기준산소농도는 다음의 식에 따라 환산하였다.

$$NO = \frac{21 - O_N}{21 - O_S} NO_S \quad (4)$$

여기서 NO는 환산 NO(ppm) 농도, O_N은 기준산소농도(%), O_S는 배가스중의 산소농도(%), NO_S는 NO의 실측치(ppm)이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 PIV기법을 이용한 유동 특성

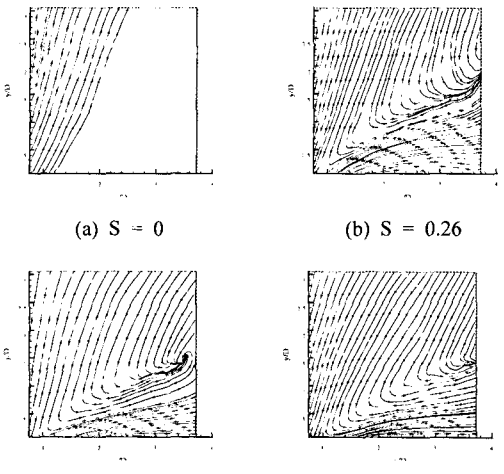
3.1.1 선회도에 따른 유선 분포

Fig. 4는 레이놀즈수(Re)가 2000일 때 각 선회도에 따른 주유동 및 유입공기의 유선 분포를 나타낸 것이다. 횡축(x/D)과 종축(y/D)은 반경방향의 거리와 축방향의 거리를 버너 스롯의 직경으로 무차원하였다. (a)는 선회도(S)가 0인 경우로 유선의 분포로부터 주유동은 직진하는 구조를 확인할 수 있으며, 유선을 벗어난 영역은 입자가 미미한 관계로 유선으로서 표현이 되지 않았다. (b)는 선회도가 0.26인 경우로 주유동이 유도관의 반경 방향을 따라 이동하고 있다. 또한 유입공기가 주유동에 흡입되어 유동방향이 바뀌는 것을 알 수 있다. (c)는 선회도가 0.6인 경우로 유도관의 끝단부에서 유입공기가 주유동과 혼합되기 위한 유동의 회전 모멘텀에 의해 와(vortex)가 생성되는 것이 나타났다. (d)는 선회도가 1.24인 경우로 반경방향의 속도가 더욱 증가하여 주유동의 폭은 좁아지나, 버너 중심과 외부의 압력 차이로 인해 유입되는 유동이 주유동으로 바뀌는 영역은 넓어진다. 선회가 강할 수록 주유동이 벽면에 더욱 근접하는 것으로 보아 버너의 타일 벽면을 따라 긴 평면 화염이 형성될 수 있고, 재순환 연소가스의 유입으로 화염 온도가 저하되어 NOx의 발생이 감소하게 될 것이다.

3.1.2 반경 및 축방향 속도 분포

Figs. 5, 6은 선회도에 따른 각 지점의 반경 및 축 방향속도 성분을 나타낸다.

Fig. 5는 버너 중심으로부터 반경방향으로 4개의 상대 위치(x/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 선회도에 따라 반경방향 속도비(U/Uavg)를 나타내었다. (a)는 x/D=1인 지점(실제 중심에서 34mm)으로 y/D의 전 지점에서 대부분의 속도가 음의 값을 갖는다. 이것은 주위공기가 버너의 중심부로 유입되고 있는 것을 나타낸다. 선회도가 높을 수록 음의 반경방향 속도가 선회도가 낮은 경우 보다 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 버너의 중심

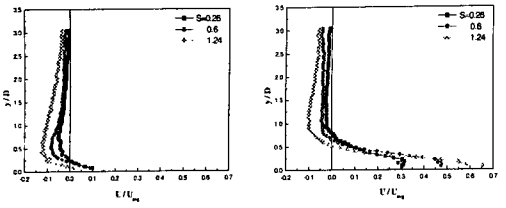


(a) S = 0 (b) S = 0.26

(c) S = 0.6 (d) S = 1.24

Fig. 4 Streamlines from ensemble averaged velocity in x-y distance ratio field with S=0, 0.26, 0.6 and 1.24

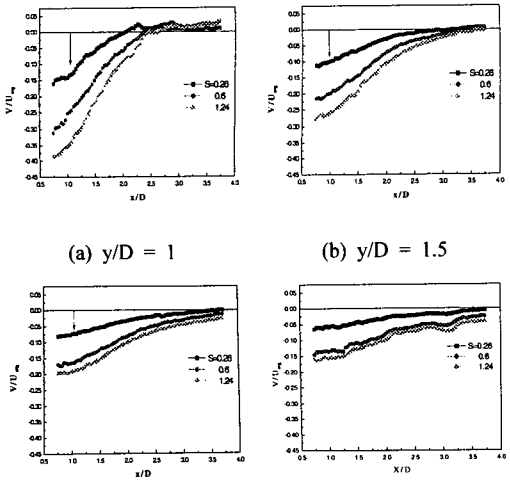
과 외부의 압력구배가 커서 재순환 되는 유동의 속도가 커지기 때문이다. (b)는 x/D=1.5인 지점으로 y/D의 위치가 낮을 수록 반경방향 속도 성분이 커지고 있으며, 선회도가 높을수록 축방향의 유동이 반경방향의 유동으로 전환됨에 따라 같은 위치에서 높은 무차원 속도를 갖는다. 반경 방향 최대 속도는 선회도가 1.24 일 때 x/D=1.5 부근에서 노즐 출구 속도(Uavg)의 0.65 정도로 나타났다.



(a) x/D = 1 (b) x/D = 1.5

(c) x/D = 2 (d) x/D = 2.5

Fig. 5 Distributions of nondimensional radial velocity ratio with radial distance ratio, x/D



(a) y/D = 1 (b) y/D = 1.5

(c) y/D = 2 (d) y/D = 2.5

Fig. 6 Distributions of nondimensional axial velocity ratio with axial distance ratio, y/D

(c)는 x/D=2인 지점으로 반경방향 속도가 증가하다가 감소하는 부분이 나타난다. 이것은 버너 벽면의 경계층으로 유동의 점성 마찰로 인해 속도가 감소하는 것으로 생각되어진다. 반경방향 거리(x/D)가 최대 속도 지점인 x/D=1.5를 지나서 2, 2.5인 하류 지점으로 갈수록 운동 모멘텀의 감소로 인해 속도 변화가 완만해짐을 보인다.

Fig. 6은 버너의 축방향 네 지점에서의 축방향 속도성분(V/Uavg)을 나타낸 것이다. (a)는 y/D=1인 지점으로 선회유동의 영향으로 버너 축 방향의 양의 속도는 없으며, 선회도가 높을 수록 버너 중심을 향하는 음의 속도 성분이 더욱 크게 나타나고, 특히 선회도가 1.24인 경우에는 축방향 최대 속도는 -0.4까지도 나타났다. 이것은 선회도의 증가로 버너의 중심부에 부압이 형성되고, 이로 인해 음의 속도가 증가하여 외부 유입 공기에 의한 재순환 영역이 형성되는 것이다. y/D=1~2.5로 축 하류 방향으로 갈수록 유입속도가 전체적으로 감소하는 경향을 보이고, 선회도에 관계없이 (a) y/D=1에서는 x/D=2.5 부근부터 축방향 속도가 0가 되고, (b) y/D=1.5에서는 x/D=3.5에서 축방향 속도가 0가 되고, (a)에서 (d)로 즉, 축 하류방향으로 멀어질수록 축방향 속도가 0이 되는 지점이 버너 중심에서 반경방향으로 이동한다. 버너 스롯의 직경(D)을 사용한 상대위치 4지점(y/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 선회도에 따른 축방향 속도를 계측하여 음의 속도값을 갖는 재순환영역의 유동패턴을 확인하였다. 연소기에 공급되는 연소용 공기는 선회도에 따라 선회운동을 하고, 선회류가 연소기 출구에서 분출됨에 따라 중심축 부근의 저압은 축방향의 압력 역구배를 형성시키며 축방향 운동에너지가 역방향의 압력구배를 극복

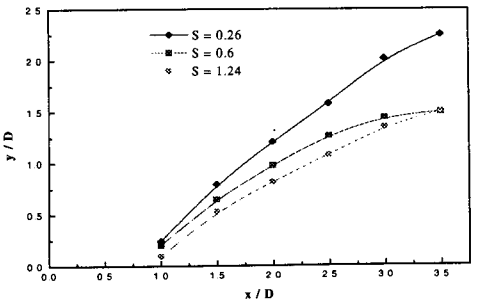


Fig. 7 Central line of boundary-layer with S=0.26, 0.6 and 1.24

하지 못할 때 재순환 영역이 형성된다. 이러한 재순환 영역은 Toroidal Vortex의 형태를 취하므로 CTRZ(Central Toroidal Recirculation Zone)라 할 수 있다.[7]

3.1.3 경계영역

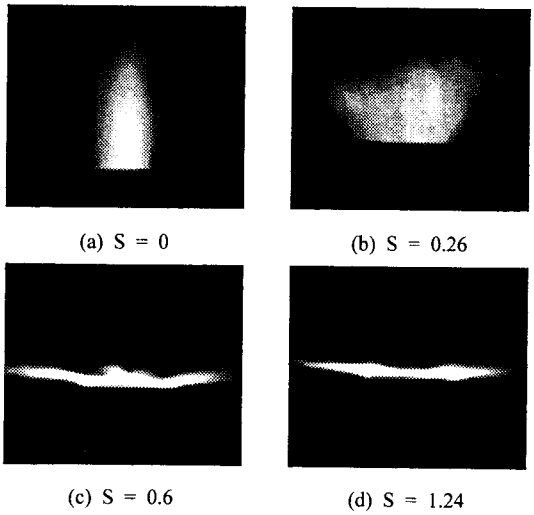
반경방향 속도장으로부터 구한 데이타를 이용하여 속도가 거의 0인 지점, 즉 주유동과 재순환되는 유동의 경계영역을 산출하였다. 이 영역은 주유동과 재순환되는 유동이 접촉하면서 유입유동의 방향이 주 유동으로 바뀌는 곳이다.

Fig. 7은 선회도 0을 제외한 3가지 선회도에 따라 경계영역의 중심을 나타낸 것으로, 경계영역은 선회도가 증가할수록 타일에 근접하여 형성되는 경향을 보였다. 이는 선회도가 증가하면서 반경방향의 속도 성분이 커서 타일면을 따라 넓게 분포하고, 재순환되어 오는 유동의 축 중심으로 유입되는 속도가 커지기 때문이다.

3.2 연소특성

3.2.1 화염의 blow-off 특성

Fig. 8은 연소부하량 2600 kcal/hr, 과잉공기비(λ) 1.0인 조건에서 각 선회도에 따른 화염형상을 촬영한 결과이다. (a)는 선회도가 0인 비선회의 경우로 화염의 형상은 원추형이며, PIV로 측정한 유선 분포와 동일한 경향을 나타내었다.



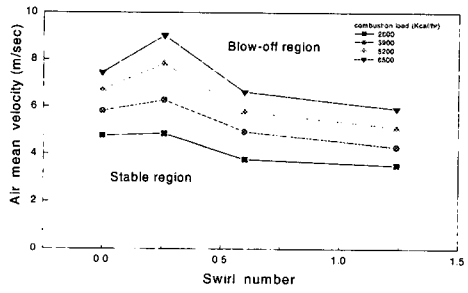
(a) S = 0 (b) S = 0.26

(c) S = 0.6 (d) S = 1.24

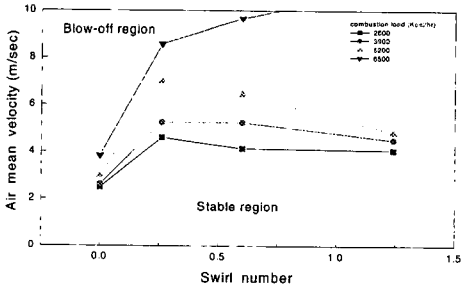
Fig. 8 Photographs of flame shape with S=0, 0.24, 0.6 and 1.24

이것은 연소공기의 비선회 분류로 인해 유동이 축방향으로 직진하므로, 화염의 중심부에서 축방향으로의 운동 모멘텀이 가장 크고 반경방향의 속도성분은 연료가스의 농도구배와 온도에 기인한 밀도차에 의하여 확산하는 것이기 때문에, 반경방향으로의 운동 모멘텀은 극히 작다. (b)는 선회도가 0.26인 경우로 화염의 길이가 비선회시에 비하여 짧고, 화염의 폭이 커졌다. 이것은 선회도의 증가에 따른 축방향의 운동 모멘텀이 반경방향 운동 모멘텀으로의 전환 때문이다. (c)는 선회도가 0.6인 경우로 화염의 형상이 버너타일을따라 안정된 평면을 유지하고 있으며, 선회도 0.26에 비해 화염이 반경방향으로 한층 발달되어 있고, 화염이 평면을 유지한다. (d)는 선회도가 1.24인 경우로, 축방향으로의 화염 발달은 극히 작고 반경방향으로 화염이 신장되어 화염두께가 극히 얇으며, 완전한 평면화염을 유지하고 있다.

Fig. 9(a)는 대기조건에서의 연소부하율별 선회도(S) 변화에 따른 화염의 blow-off 한계 특성을 나타내고 있다. 전체적으로 선회도가 0.26인 경우 blow-off 한계가 증가한다. 이것은 연료와 산화



(a) Atmospheric condition



(b) Furnace condition

Fig. 9 Blow-off limit in atmospheric & furnace conditions with S=0, 0.26, 0.6 and 1.24

Table 2 Damkohler number and turbulence reynolds number from the flow and the combustion experiment

Swirl Number	0.26	0.6	1.24
T(K)	1251	1219	1138
v'rms	4.55994	6.03493	7.20119
δ_L(m)	3.0085e-5	3.0854e-5	3.2962e-5
S_L(m/s)	7.60440	7.18674	6.18634
Re_T	94.1148	124.5576	148.6287
Da	188.4790	131.2339	88.6156

v'rms = rms velocity fluctuation × Nozzle exit initial velocity(15.5m/s)

제의 혼합이 연소에 적합하도록 잘 이루어지고 화염의 중심에 적당한 재순환영역이 존재하기 때문으로 사료된다. 선회도가 0.6, 1.24로 증가할수록 blow-off 한계속도는 감소한다. 이것은 화염 주위의 대기공기가 부압이 형성된 화염의 중심영역으로 유입되어 화염이 냉각되기 때문이다. (b)는 연소로 조건에서의 선회도 변화에 따른 화염의 blow-off 한계 특성을 나타내고 있다. 대기상태에 비해 전체적으로 속도가 감소하였다. 이것은 연소로 상태는 외부 공기의 유입이 없기 때문에 안정 영역이 좁게 나타난다. 연소부하가 6500kcal/hr인 경우를 제외하고는 선회도가 0.26 영역까지는 blow-off 한계가 증가하다가 0.26이상에서는 대기조건과 마찬가지로 선회도 증가에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 연소부하가 6500 kcal/hr인 경우는 화염의 blow-off 한계가 선회도의 증가에 따라 급격히 커지는 것으로 나타났다. 이것은 연소부하가 클 경우는 선회도 증가에 기인한 화염의 냉각효과 보다는 재순환영역으로 유입되는 열량이 커서 화염유지에 필요한 열원의 지속적인 공급과 활성화학종의 충분한 공급이 이루어지기 때문이다.

3.2.2 화염온도 분포

Fig. 10은 연소로 내의 온도분포 특성을 파악하기 위하여 연소부하 2600kcal/hr, 과잉공기비 1.2인 조건에서 선회도에 따른 반경방향(x/D)으로의 연소로내의 온도분포를 측정하였다.

선회도가 0인 경우는 반경방향으로 갈수록 온도구배는 크게 나타난다. 이것은 버너의 축중심에서 반경방향 x/D=0.5 지점까지는 화염대의 직접적인 영향을 받기 때문에 온도가 높게 나타나고,

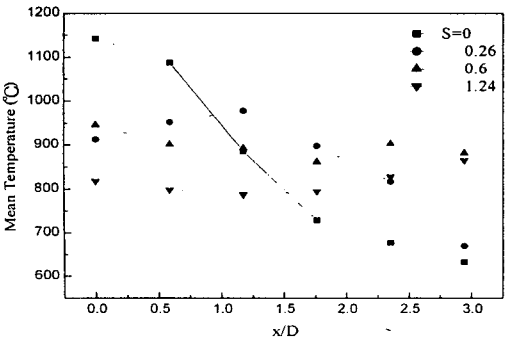


Fig. 10 Temperature distributions for radial distance with swirl number at y=30mm

x/D=0.5 이상에서부터 급격히 온도가 떨어지는 것은 화염의 폭이 좁아 화염으로부터 영향이 줄어들기 때문이다. 이 결과는 앞에 비연소장의 유선 분포를 나타낸 Fig. 4(a)의 축방향의 속도가 지배적인 것으로부터 유추할 수 있는 온도분포와 동일한 경향을 나타낸다. 선회도가 0.26인 경우 화염의 폭이 비선회시에 비해 크므로 고온역은 반경방향으로 x/D=1.2 까지 존재하고 있으며, 그 이후에서는 온도가 급격히 떨어지는 것으로 나타났다. 화염 중심부에 해당하는 x/D=0에서의 온도가 x/D=1.2 지점의 온도보다 낮게 나타나는 것은 화염장내 재순환영역의 형성 때문이다. Fig. 4(b)에서 동일한 선회도에서 비연소장의 유동장은 선회에 의해 축방향의 속도와 반경방향의 속도의 공존으로 인해 폭이 상당이 증가하였고, 재순환영역이 발생함을 유선분포를 통해 확인할 수 있다. 선회도가 0.6, 1.24인 경우, 반경방향으로의 온도분포는 선회도 0 및 0.24에 비하여 온도구배가 거의 없다. 이것은 타일의 전 영역에 걸쳐 평

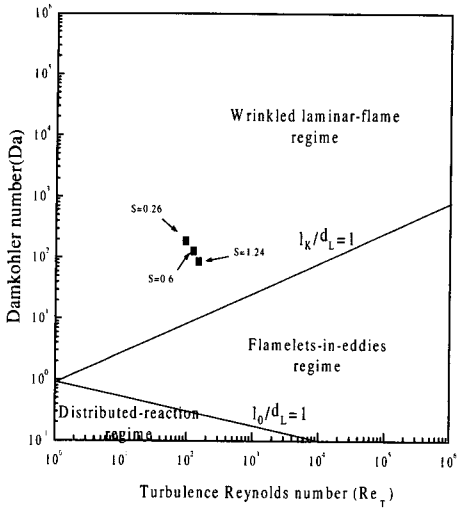


Fig. 11 Distribution regime according to Da-Re_T

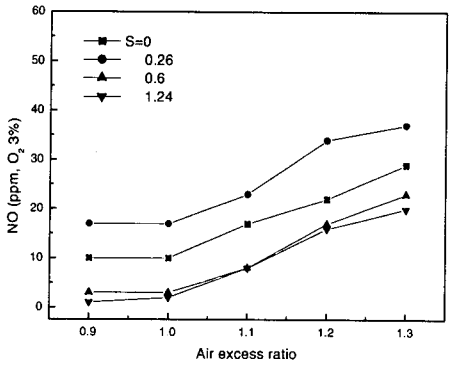


Fig. 12 NO formation characteristics by air excess ratio (2600 kcal/hr)

면 화염을 형성하여 균일한 온도분포를 나타낸다. 이 결과로 PIV로 획득한 비연소장에서 선회도에 따른 특성과 마찬가지로 실연소시 온도분포도 선회도에 따른 영향이 지배적인 것으로 나타났다.

3.2.3 Damkohler number

Table 2는 유동과 연소특성으로부터 계산되어진 난류강도(v'rms), 층류화염속도(S_L), 층류화염두께(δ_L)에 따른 난류레이놀즈수(Re_T)와 Damkohler number(Da)를 나타내었다. 층류화염속도는 선회도의 증가에 따른 온도감소로 인해 줄어드는 경향을 보였고, Re_T가 증가할수록 Da는 감소하였다.

Fig. 11은 화염구조의 특성을 Da와 Re_T에 따라 세 영역으로 나눈것으로 난류화염면의 특성이 주름상 층류화염(Wrinkled laminar regime), 에디형태 조각화염(Flamelets in eddies regime) 그리고 분포반응 영역(Distributed reaction regime)을 나타낸다.[13] 본 연구에서는 선회도가 클수록 주름상 층류화염 영역(Wrinkled laminar regime)에서 에디형태 조각화염 영역으로 진행하는 것으로 나타났다. Da에 따른 평면화염버너의 난류화염특성은 외형적으로는 선회도에 따라 벽면을 따라 넓어지는 평면화염 형태이고, 내부적으로는 주름상 층류화염 구조에서 에디형태 조각화염 구조로 천이되고 있다.

3.2.4 질소산화물(NO) 발생 특성

Fig. 12는 연소부하 2600kcal/hr에서 각 선회도별로 과잉공기비(λ)를 0.9~1.3의 범위로 변경하면서 NO의 발생량을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 각 선회도에서 λ = 0.9~1.0 까지는 NO의 변화가 거의 없었으나 λ = 1.0~1.3 범위에서는 점차적으로 증가하였다. 이것은 과잉공기비가 1.0 이하일 경우는 연소영역에서의 산소농도 저하로 NO 발생이 적고, 과잉공기비가 1.0 이상일 경우에는 연소영역에서의 산소농도가 높아지기 때문에 NO의 발생이 점점 증가한다.

일반적으로 과잉공기비가 아주 높을 경우에는 연소영역에서의 산소농도는 높아지지만 상대적으로 화염온도의 저하를 초래하여 NO의 발생은 오히려 감소하는 경향이 있으나, 본 실험 조건에서는 과잉공기비가 1.3까지는 산소농도의 영향이 NO 생성에 더 지배적인 영향인자로 나타났다.

특히, 선회도가 0.26인 경우는 선회도가 0인 경우보다 상대적으로 NO량이 많이 발생하였다. 이것은 선회도가 0.26인 경우 선회도가 0인 경우보다 국부고온 영역이 감소하나 화염의 중심영역에서 작은 재순환 영역이 존재하여 연소반응을 촉진하기 때문인 것으로 사료된다. 선회도가 0.26인 조건을 제외하고는 선회도가 증가할수록 NO의 발생량이 적은 것으로 나타났다. 이것은 선회도가 높을 경우 화염이 버너타일을 따라 평면을 유지하게 되어 화염층이 얇고 화염폭이 커지게 되어 화염의 방열성이 증대됨으로 화염중의 국부고온역 형성을 억제하며 연소실내의 연소가스가

연소영역으로 재순환되는 양이 증가하기 때문에 연소영역에서 상대적인 산소농도의 저하로 NO의 발생이 적은 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상의 평면화염 버너에 있어서 선회 유동 및 연소특성에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선회도에 따른 비연소장의 유선 분포를 통해 선회도의 증가에 따라 주유동의 확산각이 커지고, 재순환 영역이 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 화염의 blow-off 한계는 대기조건 및 연소로 조건에서 선회도가 같을 시 연소부하가 증가할수록 커지며, 선회도 변경시 약선회(S=0.26이하) 영역에서는 선회도의 증가에 따라 blow-off 한계가 커지나 그 이상의 영역에서는 선회도 증가시 blow-off 한계는 작아지는 것으로 나타났다.

(3) 온도 분포는 선회도 0, 0.26에서는 버너타일의 중심부에서 온도가 가장 높게 나타나고 반경방향과 축 방향으로 거리가 멀어질수록 낮아지는 경향이 나타났다. 이에 비하여 평면화염을 형성하는 선회도 0.6, 1.24에서는 반경방향으로의 온도분포가 균일한 경향을 보였다.

(4) Da에 따른 평면화염버너의 난류화염특성은 외형적으로는 선회도에 따라 벽면을 따라 넓어지는 평면화염 형태이고, 내부적으로는 주름상 층류화염 구조에서 에디형태 조각화염 구조로 천이된다.

(5) NO 발생 특성은 선회도가 증가함에 따라 화염의 방열성 촉진 및 연소가스 재순환영역의 증대로 화염대에서 산소농도가 저하되어 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

(1) Hoffmann, S., Lenze, B. and Eickhoff, H., 1998, "Results of Experiments and Models for Predicting Stability Limits of Turbulent Swirling Flames," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*, Vol. 120, No. 2, pp. 311~316.

(2) Yegian, D.T. and Cheng, R.K., 1998, "Development of a Lean Premixed Low-Swirl Burner for Low NOx Practical Applications," *Com. Sci. and Tech.*, Vol. 139, No 1, pp. 207~227.

(3) Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., 1976, "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers," *J. of The Institute of Fuel*, Vol. 41, pp. 238~240.

(4) Chaturvedi, M.C., 1963, " "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansion," *Proceedings, J. of the Hydraulics Division, ASCE,* Vol. 89, No. HY3, pp. 61~92.

(5) 이상남, 윤형기, 류정인, 1996, "Flow Field Characteristics of a High Load Combustor," 1996 대한기계학회 춘계학술대회논문집(B), pp. 58~63.

(6) Chiger N.A. and Yule A.J., 1979, "The Physical Structure of Turbulent Flame", AIAA 79-0217, pp. 1~8.

(7) 山口, 大岩, 中桐, 楠, 高間, 1983, "平面上 斷流中의 亂流擴散火焰 (coherent 構造火焰의 擧動)",日機論(B), vol. 46, pp. 981~990.

(8) Stephan E. Schmidt, Paul O. Hedman, 1995, "CARS Temperature and LDA Velocity Measurements in a Turbulent, Swirling, Premixed Propane/Air Fueled Model Gas Turbine Combustor," ASME, 95-GT-64

(9) Adrian R. J., 1991, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," Annu. Rev. Fluid, Mech., Vol. 23, pp. 201~304.

(10) Sang-joon Lee, 1999, "PIV-Velocity Field Measurement." POSTECH.

(11) Chang, T. P., 1985, "Image Processing of Tracer Particle Motion as Applied to Mixing and Turbulent Flow," *Chemical Engineering Science*, Vol. 40, No. 2.

(12) Armstrong, N. W. H. and Bray K. N. C. ,1992, "Premixed Turbulent Combustion Flowfield Measurement Using PIV and LST and Their Application to Flamelet Modeling of Engine Combustion," SAE No. 922322.

(13) Stephan R. Turns., 2000, "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications" McGRAW-HILL.