

난류 비예혼합 평면화염의 유동과 연소 특성

곽지현* · 정용기* · 전충환** · 장영준*
(2002년 9월 5일 접수, 2003년 3월 5일 심사완료)

The Characteristics of the Flow and Combustion in a Turbulent Non-Premixed Flat Flame

Ji-hyun Kwark, Yong-ki Jeong, Chung-hwan Jeon and Young-june Chang

Key Words: Flat Flame(평면화염), Swirl Number(선회수), Recirculation(재순환)

Abstract

An experiment in a turbulent non-premixed flat flame was carried out in order to investigate the effect of swirl number on the flow and combustion characteristics. First, stream lines and velocity distribution in the flow field were obtained using PIV method. In contrast with the axial flow without swirl, highly swirled air induced stream lines along the burner tile, and backward flow was caused by recirculation in the center zone of the flow field. In the combustion, the flame with swirled air also became flat and stable along the burner tile with increment of the swirl number. Flame structure by measuring OH and CH radicals intensity and by calculating Damköhler number(Da) and turbulence Reynolds number(Re_t) was examined. It appeared to be comprised in the wrinkled laminar-flame regime. Backward flow by recirculation of the burned gas decreased the flame temperature and emissions concentrations as NO and CO. Consequently, the stable flat flame with low NO concentration was achieved.

1. 서론

급속한 산업화, 공업화의 결과로 나타난 환경 오염 문제 중 특히 대기오염 물질은 지구온난화, 산성비, 오존층 파괴 등의 심각한 부작용을 일으켜 왔으며 산업 현장에서도 저공해 연소기의 개발이 중요한 문제로 자리잡은지 이미 오래다. 다만 연소, 고온공기연소 등 많은 신기술이 대두되고 있는데 그 중 연소기의 특별한 형상에 의한 연소가스의 재순환을 유도하여 NO_x를 저감시키는 평면화염 연소 기술이 있다. 이는 연소공기에 강한 선회력을 수반하여 중심축상에 넓은 재순환 유동을 발생시키고, 이로 인해 고온의 연소가스가 역류함으로써 연료와 공기의 혼합이 촉진되어

넓은 연소 범위에 걸쳐서 안정된 고부하 연소가 가능하다.⁽¹⁾ 또한 화염 면적이 증가하여 화염온도가 낮아지고, 연소가스의 재순환으로 산소 농도가 낮아져 NO_x가 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 등^(3,4)은 3차원 구형피토타관을 사용하여 3차원 난류유동장을 측정하였으며 강선회류는 연소실 중앙부에 재순환영역을 발생시킴을 확인하였다. Lee 등⁽⁵⁾은 고부하 연소기의 유동장 특성에 관한 연구에서 연소실 팽창각에 따른 유동 특성과 선회수의 증가에 따른 재순환 영역의 축방향의 속도가 증가하는 것을 관찰하였다. Chigier와 Yule⁽⁶⁾은 프로판과 공기의 전단층에 형성되는 분류화산 화염에 관한 연구에

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소
E-mail : changyj@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)582-9818

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

서 혼합영역 내에서 와류링이 형성되어 난류 혼합을 촉진시키고 있음을 확인하였다. Yamaguchi 등⁽⁷⁾은 평면 전단류중에 형성되는 난류확산 화염을 대상으로 실험과 수치계산을 통해 코히어런트 구조와 난류 확산 기구를 조사하였다. 이와 같이 선회수와 그에 따른 재순환영역에 대한 연구는 많이 이루어져 있지만, 유동의 흐름을 교란할 여지가 있는 피토포관을 이용한 연구나, LDV에 의한 국소 유동장에 대한 연구, 또는 smoke 가시화를 통한 정성적 유동 패턴이 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 유동에 방해가 없고 정량적으로 전체 유동장의 특성을 살펴볼 수 있는 PIV 측정법으로 유동 패턴과 속도 분포 등의 비연소 유동장의 정량적 해석을 수행하고,⁽⁸⁾ 연소장의 화염 온도 분포와 라디칼 측정, 연소가스의 농도 분포를 측정하여 선회류를 수반한 확대 유도관 방식의 평면 화염 연소기의 화염 구조 및 연소 특성을 고찰해 보고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 평면화염 연소기의 유동 및 연소 특성을 고찰하기 위하여 사용한 실험 장치는 크게 유동특성 실험 장치와 연소특성 실험 장치로 나누어 진다. Fig. 1은 유동특성 실험 장치이다. 실제 연소기와 같은 크기와 모양을 가지는 아크릴 재질의 모형을 만들어 PIV 방법을 이용하여 유동 실험을 하였다. 장치는 크게 모형 버너와, 라스킨 노즐을 이용하여 마이크로 크기 이하의 오일 입자를 추적 입자로 사용하는 입자공급부, 광원인 파장 532nm의 Nd:YAG 레이저와 CCD카메라, 컴퓨터로 구성된 영상 취득부로 구성 된다. 속도 벡터는 2프레임 상호상관법을 이용하였고,

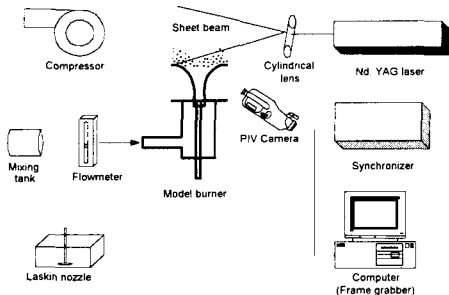


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for PIV measurement

고, 프레임 사이 간격은 $160\mu s$ 이며,^(9~12) 각각 1000장의 화상을 취득하여 앙상블 평균 처리 하였다. 공기 유량은 연소 조건과 똑같이 하여 이 혼혼합비에 해당하는 $71.4 l/min$ 를 공급하였다.

평면화염의 연소 특성을 고찰하기 위한 장치는 Fig. 2와 같다. 대상 버너와 연료 및 공기 공급장치, 화염온도 측정 및 기록 장치, 연소가스 농도 측정장치로 구성된다. 연료는 LPG인 프로판을 사용하고 공기는 출력 0.75kW의 송풍기로 서지 탱크를 거쳐 연소기로 공급 된다. 온도 측정은 R 타입(Pt/Pt-Rh 13%) 열전대와 다채널 동시 기록이 가능한 디지털 온도 기록장치로 테스트 섹션 내의 각 지점에서 2초 간격으로 30회 씩 측정하여 난류화염의 특성을 조사하였고, 연소 가스의 농도 측정은 전기 화학센서가 장착된 가스분석기에 수냉식 프로브를 부착하여 국소 NO 및 CO, CO₂의 농도를 측정하였다. 또한 간섭 필터와 CCD 카메라를 이용하여 화염의 중간생성물인 OH와 CH 라디칼의 자발광 사진을 찍어 평균 처리하여 강도를 측정하고 연소특성을 살펴보았다.

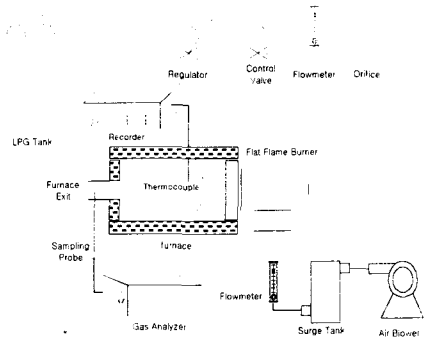


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus for combustion

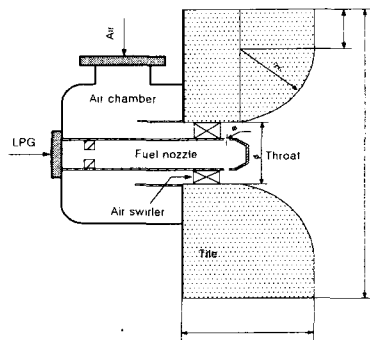


Fig. 3 Detail of the flat flame burner

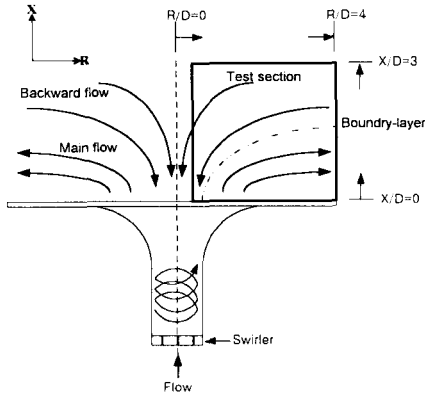


Fig. 4 Test section for measurement

본 연구에 사용한 평면화염 연소기의 상세도는 Fig. 3과 같다. 연료와 공기가 나오는 스롯 부분에서 바깥쪽 버너 타일부로 갈수록 직경이 커지는 나팔관형 모양의 연소기로 타일부 직경 250mm, 스롯 직경 28mm, 목 직관부 길이 65mm, 곡률반경 56mm의 벤치스케일 버너이다. 연료는 직경 2mm인 12개의 노즐을 통해 반경 방향으로 분출되어 공기와 수직으로 혼합된다. 연료 노즐 주위에 베인형 선회기가 장착되어 있으며 1.5mm×5mm 크기의 슬릿상의 분출구 6개를 가지고 있어 슬릿의 각도에 따라 선회수 (swirl number)가 결정되며, 이것이 커질수록 화염이 넓게 분포하여 타일을 따라 평면 화염을 형성 하게 된다. 선회수는 축방향 운동량에 대한 각 운동량의 비로 구해지는 무차원수로 식 (1)과 같이 구하였다.⁽¹³⁾ 실험에 적용한 선회수는 슬릿의 각도 0°, 20°, 40°, 60° 에 해당하는 0, 0.26, 0.6, 1.24이다.

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

단, θ 는 슬릿의 각도, σ_r 은 선회기 내경과 외경의 직경비이다.

Fig. 4는 본 실험에서 유동 및 연소 특성을 조사한 테스트 영역을 나타낸 그림으로 이 영역의 유동 속도 분포와 화염의 온도 분포, 연소가스의 농도 등을 측정하였다.

Table 1에 유동 및 연소 실험에 관한 자세한 실험 조건을 정리하여 나타낸다.

Table 1 Experimental condition

Item	Flow (PIV)	Combustion
Flow rate(lpm)	Fuel	3
	Air	71.4
Combustion load(kW)	×	4.5
ϕ	×	1.0
Radicals	×	OH, CH
Emissions	×	NO, CO, CO ₂ (Test section) NO (at the furnace exit)
Swirl number		0, 0.26, 0.6, 1.24

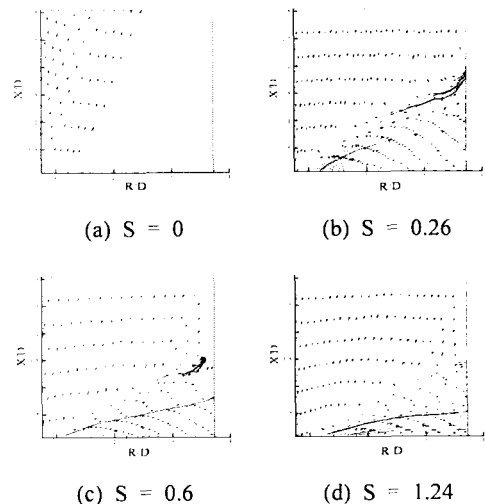


Fig. 5 Streamlines from ensemble averaged velocity according to swirl number

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 평면화염 연소기의 유동 특성

3.1.1 선회수에 따른 유선 분포

PIV법을 이용해 구한 테스트 영역의 속도 벡터를 이용해 Fig. 5에 유동장의 유선 분포를 나타내었다. 가로축은 버너 타일을 따라가는 반경 방향이고 세로축은 축방향으로, 각각 버너 스롯의 직경 D로 나누어 무차원화 하였다. S=0인 (a)에서 유동은 축방향을 따라 분출되는 주 유동만 관찰되고 있다. 그러나 선회수가 0.26인 (b)에서는 반경 방향으로 선회하는 주유동 외에 스롯 중심쪽으로 후진하여 들어오는 후류의 유동을 관찰

할 수 있다. 이는 주유동이 버너 타일을 따라 움직이면서 중심부에 부압이 형성되어 공기가 빨려들게 되는 것으로, 선회수가 증가할수록 이러한 경향은 더욱 커지게 된다. 따라서 연소시 기연가스가 화염면 쪽으로 재순환되는 연소가스의 재순환 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 선회수 0.6인 (c)에서 주유동과 후류의 경계 말단부에 유입공기와 노즐에서 분출된 주유동 공기가 혼합되기 위한 회전 모멘텀에 의해 와(vortex)가 생성되어짐이 보이며, 선회수 1.24인 (d)에서는 주유동이 버너 타일에 부착되어 두께가 얇아지고 후류와 완전히 구분되는 것을 알 수 있다. 그러므로 연소시 타일을 따라 완전한 평면화염이 형성되고 연소 가스가 화염면 쪽으로 재순환되어 연소 특성을 변화시킬 것이라 예상할 수 있다.

3.1.2 선회수에 따른 속도 분포

유동장 내의 반경 및 축방향으로의 속도 분포를 알아보기 위해 임의의 위치를 선정하여 각 위치에서의 선회수에 따른 상대속도를 구하였다. Fig. 6은 반경방향 내근대 위치(R/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 선회유동의 반경방향 속도성분(U)을 공기 노즐의 분출 속도(U_{avg})로 나눈 무차원 속도로 표시하였다.(선회수 0의 경우는 주유동만 존재하므로 비교하지 않았다) (a)에서 보듯이 대략 X/D=0.3 이하를 제외한 모든 높이에서 음의값을 가지는데 이는 버너 중심에 가까운 (a) 지점에서 주유동보다 후류가 지배적임을 알 수 있다.

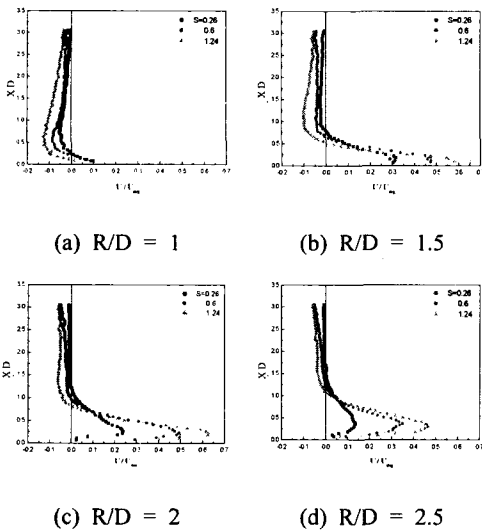


Fig. 6 Distributions of the nondimensional radial velocity at each radial distance

R/D=1.5인 (b) 위치에선 X/D=0.5 이하에서 주유동이 존재하여 속도가 양의 값을 가지는데 선회수가 클수록 상대속도는 더욱 크고 동시에 상단부의 후류의 음의 속도도 더 커짐을 알 수 있다. 즉 선회수가 커질수록 축방향 유동이 반경방향으로 전환되기 때문이다. R/D=2인 (c)에서 유동속의 부호가 바뀌는 위치가 대략 X/D=0.8에서 1.0 사이로 더욱 커지는데 이는 버너 타일을 따라 바깥쪽으로 갈수록 유동층의 두께가 두꺼워짐을 보여주고 있다. 그런데 특이한 점은 (c)와 (d)의 R/D=2 이상의 위치에서 타일 바로 위의 유동속도가 타일면에 근접할수록 작아지는 것을 볼 수 있는데 이는 타일의 경계층 영역으로, 점성마찰로 인해 속도가 감소하는 것으로 생각된다. R/D가 커질수록 운동모멘텀도 감소해 유동 속도도 줄어든다. Fig. 7은 축방향 4지점(X/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 유동의 축방향 무차원 속도를 나타낸다. (a)의 X/D=1 지점에서 R/D=2 이하인 버너 중심 쪽에는 이미 음의 속도분포를 나타내고 있고, 이는 왕성한 후류의 유동을 의미한다. 선회수가 클수록 유동의 속도도 크고, S=0.26일 때 -0.15에 비해 S=1.24의 경우 -0.4에 달한다. (b), (c), (d)에서 보듯이 축방향 위치가 높아질수록 반경방향의 모든 영역에서 후류만 존재하게 되고, 선회수에 의한 차이는 줄어든다. 즉 버너 타일에 가까울수록, 슬롯 중심부에 가까울수록, 선회수가 클수록 후류의 속도는 빨라진다. 연소 공기가 선회운동을 할 때 선회수가 분출됨에 따라 중심축의

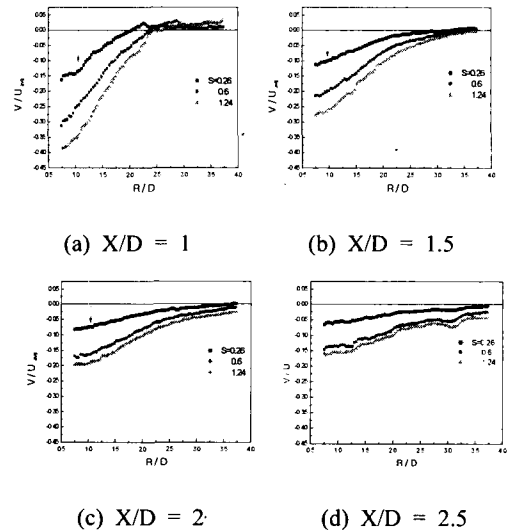


Fig. 7 Distributions of the nondimensional axial velocity at each axial distance

중심축의 부압은 축방향의 압력 역구배를 형성시키며 축방향 운동에너지가 역방향의 압력구배를 극복하지 못할 때 재순환 영역이 형성된다. 이러한 재순환 영역은 Toroidal vortex의 형태를 취하므로 CTRZ(Central Toroidal Recirculation Zone)라 할 수 있다.⁽⁷⁾

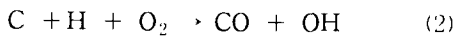
3.1.3 경계 영역

반경방향 속도장으로부터 구한 데이터를 바탕으로 속도가 0인 지점을 구해내면 주유동(main flow)과 후류(backward flow)의 경계 영역을 찾아낼 수 있다. 이 경계는 주유동과 재순환 되는 후류가 접촉하는 부분으로 연소시 화염면이 형성될 것으로 생각된다. Fig. 8은 선회수(S=0 제외)에 따른 경계 영역을 나타낸다. 선회수가 증가할수록 타일에 근접하여 형성됨을 알 수 있으며, 연소시 평면화염을 만들 것으로 기대된다.

3.2 평면 화염의 연소 특성

3.2.1 라디칼 분포 특성

연소 과정에서 생성되는 중간생성물 중 반응 영역대의 지표가 되는 주요한 라디칼로서 OH와 CH 라디칼이 있다. Dyer와 Crosely의 연구^(11,12)에 의하면 여러 소반응 중 OH 라디칼은



의 반응에서 발생하여 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 로 전이할 때 발하는 (0,0), (1,0), (1,1) 밴드의 발광이 대부분이며, 또한 프로판 연료의 핵심 산화반응 과정인⁽¹⁶⁾ (3)식의 반응물로서 연소반응 영역의 중심에 나타난다.

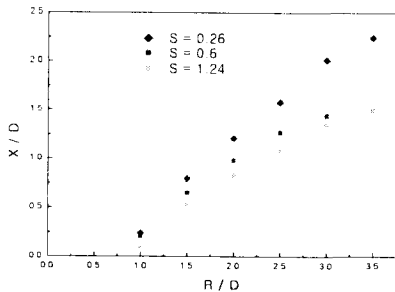
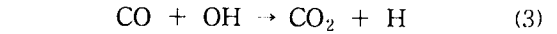
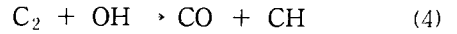


Fig. 8 Recirculation boundary according to swirl number



또한 CH 라디칼은



의 반응에서 주로 생기며 $A^2\Delta \rightarrow X^2\Pi$ 로 전이할 때 발하는 (0,0) 밴드의 발광이 대부분이며 431nm 부근의 파장을 가져 청색이다.

Fig. 9에 노즐 중심에서 찍은 화염의 OH 라디칼 사발광의 상대 강도를 화상 처리하여 선회수별로 나타내었다. 공기가 분출되는 선회기 슬릿 부분에서 반응이 가장 활발히 일어나고 있으며, 선회수 0인 직화염의 강도가 가장 크고 선회수가 증가할수록 약해진다. 이는 일차적으로 반경 방향 운동량 증가에 따른 축방향의 유동 속도가 감소하여 연소 반응속도가 낮아지기 때문이다. 또한 유동 실험에서 살펴 보았듯이 노즐 중심에서의 후류의 형성으로 연소 가스의 재순환이 이루어져 화염면과 접촉하게 되면서 O₂ 분자의 공격 경로가 위축되어 OH의 생성 반응이 억제되기 때문이다. 높은 선회수에서 국소적으로 강한 OH 라디칼의 분포가 없어지므로 국소 고온 영역이 사라지고, NO의 발생도 감소할 것으로 예상된다.

Fig. 10에 선회수에 따른 노즐 중심선상의 OH 라디칼의 상대 강도를 비교하였다. 선회수 0인 화염에 비해 선회 화염으로 갈수록 라디칼 강도는 약해지고, 최고 2배 이상 차이가 난다. 그러나 선회수 0.6 이상에선 크게 줄지 않았다.

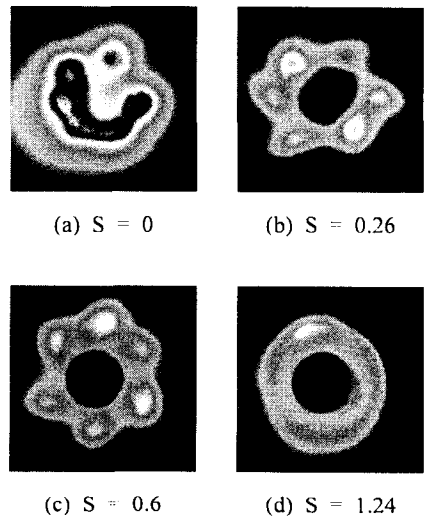


Fig. 9 OH radical luminous intensity(A.U.)

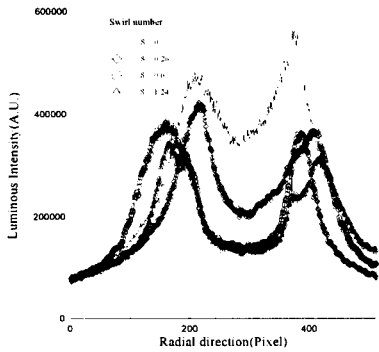


Fig. 10 OH radical luminous intensity (At the nozzle center)

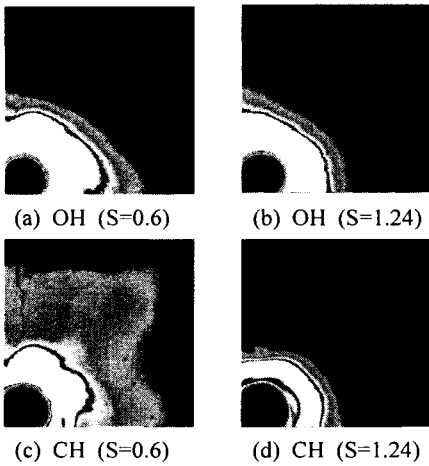


Fig. 11 OH and CH radical intensity (A quarter of the tile)

선회수 0.6 이상의 평면화염 형성시 화염면에서 분포하는 라디칼의 특성을 살펴보기 위해 Fig. 11과 같이 타일면 1/4에 해당하는 영역의 라디칼 분포를 측정하였다. OH와 CH 라디칼 모두 선회수 0.6 보다 1.24에서 낮은 강도를 나타내며 분포 영역도 좁게 나타난다. Fig. 12에 노즐 중심에서 반경 방향으로 타일의 중심선을 따라 라디칼 강도를 나타내었다. 특히 타일의 1/3 지점 이후에서의 감소가 두드러지게 보이는데, 이는 Fig. 8에 나타난 재순환류와 주유동의 경계영역의 시작지점과 일치함을 보여 연소가스의 재순환이 화염의 연소반응에 직접적인 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 라디칼 강도의 구배가 큰 Pixel 300과 350 사이는 버너 스톱에서 타일면 사이의 확대관 부분으로 이 영역의 온도 구배와 RMS 값도 클 것으로 예상된다.

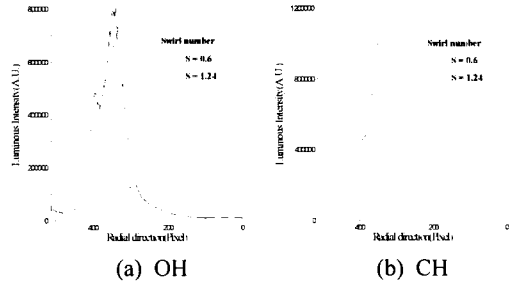


Fig. 12 OH and CH radical intensity (Along the center line on the nozzle)

3.2.2 화염장의 온도 분포

난류 화염의 순간온도는 난류 형태의 온도나 유동 특성을 나타내는데 유용한 방법인 Reynolds 분해를 이용하여 다음과 같이 평균성분 (\bar{T})과 변동성분 (T')으로 나누어 나타낼 수 있다.¹⁷⁾

$$T(t) = \bar{T} + T'(t) \quad (5)$$

선회수에 따른 화염의 온도 분포를 살펴 보기 위해 평면화염 형성시 화염면에 해당하는 축방향거리 $X/D=0.5$ 에서 반경방향으로의 평균온도 분포를 구해 Fig. 13에 도시하였다. 선회수가 커질수록 화염의 최고 온도 위치도 타일 바깥쪽으로 옮겨가고 있다. 선회수 0.26 이하의 화염은 거리가 증가할수록 화염에서 벗어나므로 온도도 급격히 떨어진다. 그러나 선회수 1.24의 평면화염은 $R/D=3$ 에서 최고 온도를 보인다. 테스트 섹션 전체연소장의 온도 분포를 Fig. 14에 나타낸다. 선회수에 따른 온도 분포는 확연히 다른 경향을 보인다. 선회수 0인 직화염의 경우 그림 (a)처럼 고온 영역이 노즐 중심축을 따라 축방향으로 길게 분포하고 있고, 선회수가 커질수록 온도 분포는 화염장 전체로 퍼져 가며, 최고 화염 온도 위치도 노즐 중심에서 타일 바깥쪽으로 옮겨간다. 특히 연소 가스의 재순환이 활발한 선회수 0.6 이상의 경우 타일 중심쪽에 강한 후류가 형성되어 100℃ 미만의 온도장이 형성 되었다. 또한 $S=1.24$ 일 때 화염의 최고 온도도 $S=0$ 인 직화염보다 200℃ 가량 낮게 나타나 NO의 발생도 저감되리라 생각된다. 넓은 영역에 균일한 온도 분포는 공업로에서 피열체를 가열할 때 복사열에 의한 보다 균일한 가열이 가능할 것으로 사료된다. 난류 화염의 온도 특성을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 Fig. 15, 16에 화염온도의 제곱평균제곱근(RMS)의 분포를 나타낸다. 선회수 0인 직화염은

주로 화염의 가장 자리에서 온도 변동이 크게 나타나고 있어 주위 공기와의 밀도차가 큼을 알 수 있다. 선회수 0.26의 경우 화염 모양이 가장 불안정해서 온도 변동도 불규칙적인데 화염 끝부분의 위쪽과 오른쪽에서 특히 변동이 크다. 선회수 0.6의 경우는 화염면을 따라 후류와의 재순환이 이루어지는 경계영역에서 온도 변동이 크게 나타나고 있다. 그러나 선회수 1.24의 화염장에선 보다 활발한 연소가스의 재순환이 이루어져 온도 변동이 크지 않음을 알 수 있다.

3.2.3 Da와 Re_T로 살펴본 화염의 구조

이상과 같은 유동과 연소 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 본 평면화염의 구조를 해석하기 위해 Da와 Re_T를 계산하여 화염의 형태를 분석하여 보았다.

특성 화학시간과 특성 유동시간의 비를 나타내는 무차원수 Da와 난류 레이놀즈수 Re_T, 층류연소속도 S_L, 층류화염두께 δ_L, 유동장의 난류강도 ν_{rms} 등을 각 선회수에 따라 아래 식^(18,19)과 같이 구하여 Table 2에 정리하였다.

$$Da = \frac{l_0 / \nu_{rms}}{\delta_L / S_L} \quad (6)$$

$$Re_T = \nu_{rms} l_0 / \nu_b \quad (7)$$

$$S_L = S_{L,ref} \left(\frac{T_u}{T_{u,ref}} \right)^\gamma \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^\beta \quad (8)$$

$$\delta_L \cong 2\alpha / S_L \quad (9)$$

단, l₀는 적분길이 스케일, ν_b는 동점성계수, T_u는 화염온도, P는 주위압력, γ, β는 각각 온도 및 압력지수, α는 열확산계수를 나타낸다.

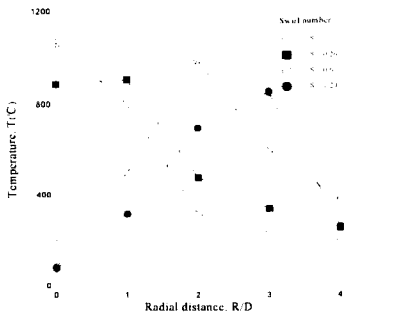


Fig. 13 Temperature distribution in the radial direction at X/D=0.5

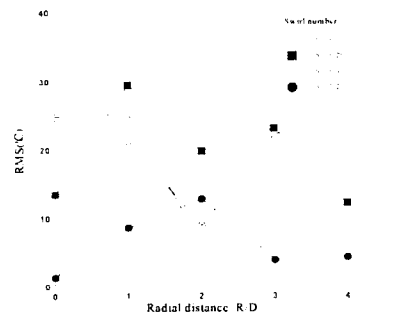


Fig. 15 RMS distribution in the radial direction at X/D=0.5

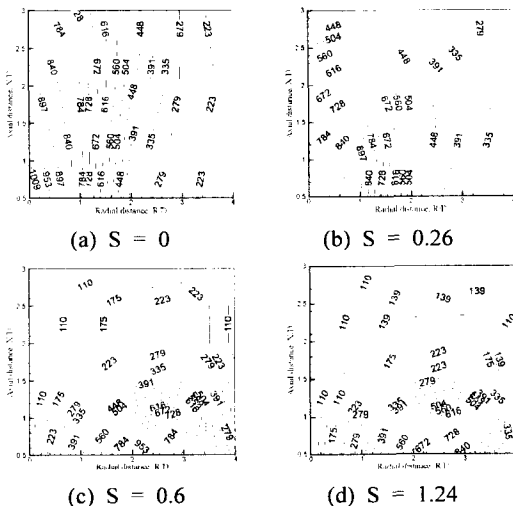


Fig. 14 Temperature distribution in the test section

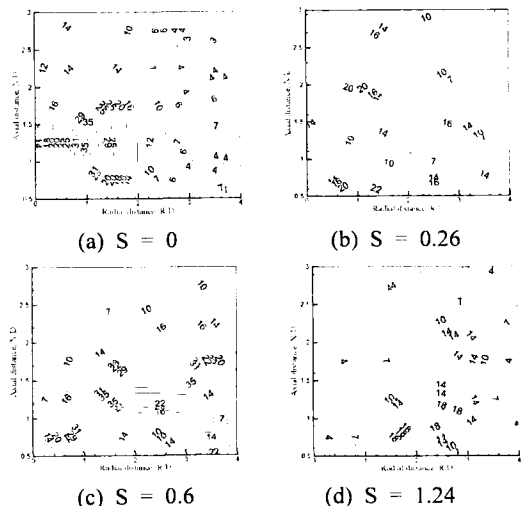
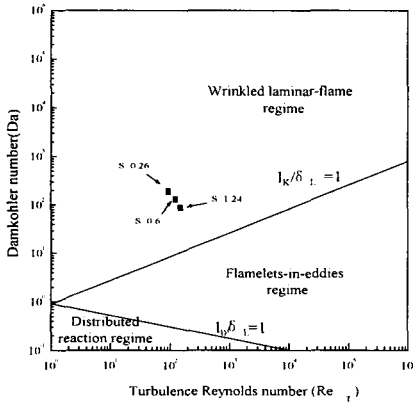


Fig. 16 RMS distribution in the test section

Table 2 Damköhler and turbulence Reynolds number from the flow and combustion experiment

Swirl Number	0.26	0.6	1.24
$T_{max}(K)$	1298	1261	1125
v_{rms}	4.55994	6.03493	7.20119
$\delta_L(m)$	$3.0085e-5$	$3.0854e-5$	$3.2962e-5$
$S_L(m/s)$	7.60440	7.18674	6.18634
Re_T	94.1148	124.5576	148.6287
Da	188.4790	131.2339	88.6156

**Fig. 17** Distribution regime according to Da vs Re_T

선회수가 증가할수록 화염의 최고온도가 감소하고 이에 따라 연소속도도 감소한다. 따라서 화염 두께는 증가하며 특성 화학시간이 길어진다. 난류강도의 증가로 인해 특성 유동시간은 짧아지므로 Da는 감소하게 된다. 반면에 난류 레이놀즈수는 증가한다. Fig. 17은 난류화염의 형태를 Da와 Re_T 에 따라 주름층류화염 영역, 에디 형태 조각 화염 영역, 분포반응 영역의 세 영역으로 나누어 놓은 그래프로,⁽²⁰⁾ 실험에서 산출된 Da와 Re_T 를 그래프에 표시하면 본 평면화염은 주름층류화염 영역에 해당된다. 그리고 선회수가 증가할수록 에디 형태 조각화염 영역으로 접근해감을 알 수 있다. 따라서 더 작은 길이 스케일을 가지는 난류화염으로 발달해가는 형태이며 고부하 연소가 가능할 것이다. 이상에서 종합한 본 화염의 구조는 외형적으로 버너 타일을 따라 펼쳐지는 평면 화염이며, 내부적으로는 주름층류 화염에서 에디 형태 조각화염으로 전이되는 구조라 할 수 있다.

3.2.4 연소 가스 농도 분포

연소장 내의 주요 배출물의 국소 농도 분포를 살펴보기 위해 먼저 화염면 부근인 $X/D=0.5$ 에서의 반경방향거리에 따른 농도 분포를 Fig. 18에

나타내었다. NO의 경우 화염의 최고 온도 지점에서 가장 높게 나타나 열적 NO의 생성기구가 지배적으로 보인다. CO도 비슷한 경향을 보이나 선회수 0.6이상에선 화염 종류에서 활발히 생성되고 있다. 여기서 CO는 불완정 연소에 의한 연소 배출물이 아니라 산화반응 과정 중에 나타나는 중간생성물임을 알 수 있다. 두 화확종 모두 선회수 0.6 보다 1.24일 때 화염 후류 쪽에서 농도가 더욱 낮게 나타나 연소가스 재순환에 의한 효과가 뚜렷하다. CO₂의 농도는 선회수 0.6 이상에서 큰 차이가 없어 선회수 0.6이상의 연소반응은 연료와 공기의 혼합 촉진과 재순환 효과에 의하여 완전 연소에 가까워진다. Fig. 19와 Fig. 20에 NO와 CO의 화염장의 2차원 농도 분포를 도시하였다. 선회수에 따른 농도분포는 뚜렷이 구분되며 온도 분포와 유사한 형태를 나타낸다. 선회수 증가에 따라 최고 농도도 크게 낮아지는데 특히 선회수 0.6 이상일 때 노즐 중심쪽의 재순환 영역에선 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 연소기를 로 내에서 가동했을 때 출구에서 방출되는 NO의 농도특성을 살펴보았다. Fig. 21은 로 출구에서 측정된 NO의 농도를 산소농도 11%로 환산한 것이다. 가장 큰 온도 RMS를 가지는 선회수 0.26의 화염이 불안정 연소에 의한 NO의 농도가 가장 높으며, 선회수 증가에 따라 농도는 감소한다. 선회수 0에 비해 1.24의 경우 최고 1/4로 저감되었다.

Fig. 22는 $X/D=0.5$ 지점에서 반경방향을 따라 화염 온도와 RMS, 주요 배출물의 농도를 비교한 것이다. 선회수 0인 직화염의 경우 화염 내부인 $R/D<1.5$ 영역에서 온도 구배가 크고, 주요 배출물의 농도 구배도 크게 나타난다. 반면에 선회수 1.24인 평면화염에선 최고 온도 지점에서 RMS가 낮게 나타나 화염이 상당히 안정되어 있음을 알 수 있다. 이 지점에서 NO의 농도가 가장 높으나 CO는 저감 되는 경향을 보인다. 연소 반응이 촉진되어 CO가 CO₂로 산화되기 때문이다.

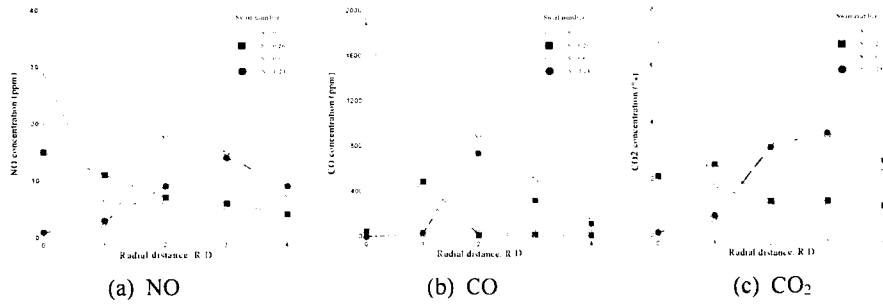


Fig. 18 NO, CO, CO₂ concentration in the radial direction at X/D=0.5

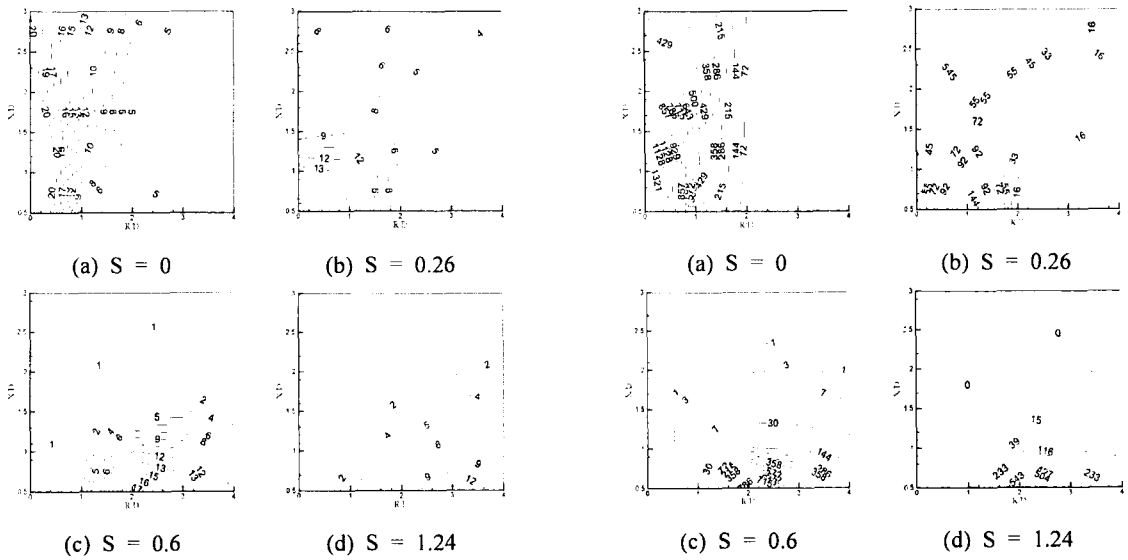


Fig. 19 NO distribution (ppm)

Fig. 20 CO distribution (ppm)

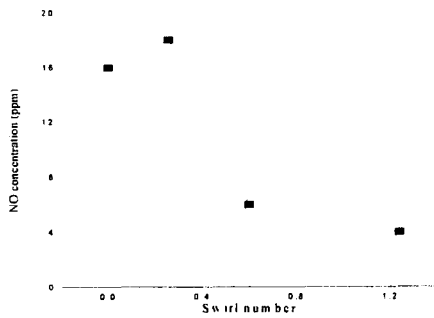


Fig. 21 No concentration at furnace exit according to swirl number

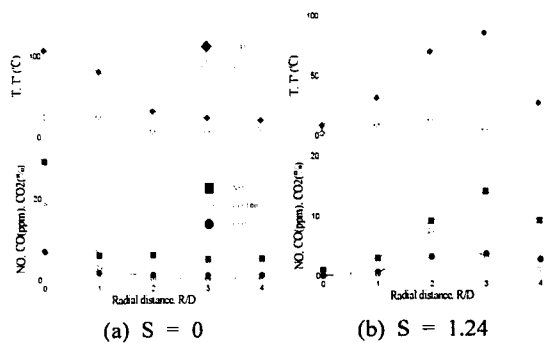


Fig. 22 Comparison of the temperature distribution with emissions (at X/D=0.5)

4. 결론

나팔관형 확대관을 가지는 비에혼합 평면 화염 버너의 유동과 연소 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

연소기의 기하학적인 설계에 의해 연소가스의 재순환을 유도하여 화염의 온도를 낮추고 NO_x를 저감시켜 평면화염의 연소 특성을 지배하는 주요 인자는 선회수이다. 선회수에 의해 달라지는 연료와 공기의 유동 조건에 따라 연소장 내의 유동 패턴이 확연히 다르게 나타났으며 이는 연소시 화염의 형태와 구조를 지배하게 된다. 강력한 선회를 동반한 연료와 공기는 연소시 화염 중심부에 큰 압력 구배를 가지는 연소가스의 재순환 영역을 만들어 연소반응을 변화시켰다. 화염 내부의 중간생성물인 연소 라디칼 계측을 통해 확인했듯이 주요 라디칼의 강도 변화는 여러 소반응에 직접적인 영향을 미쳐 총괄 반응기구의 생성물의 물분율을 바꾸게 되고 이것은 화염 온도와 연소가스의 농도 변화로 나타났다. 일반적인 선회 화염은 강한 난류 성분으로 인해 온도의 변동 성분이 크지만 본 평면화염은 오히려 높은 선회수에서 화염의 온도 변동이 작게 나타나 균일한 열처리가 필요한 로에서 유용하리라 생각된다. 또한 로 출구에서의 NO 농도가 최고 1/4로 감소하는 결과를 얻음으로써 본 연소기의 실용성은 대단히 크다.

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 American Society of Mechanical Engineers*, 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 NO_x Practical Applications," *Combustion Science and Technology*, Vol. 139, No 1, pp. 207~227.
- (3) Mathur, M.L. and Maccallum, N.R.L., 1976, "Swirling Air Tests Issuing from Vane Swirlers," *Journal of The Institute of Fuel*, Vol. 41, pp. 23~240.
- (4) Chaturvedi, M.C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansion," *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 89, No. HY3, pp. 61~92.
- (5) Lee, S. N., Yun, H. G., and Ryoo, J. I., 1996, "Flow Field Characteristics of a High Load Combustor," *Korea Society of Mechanical Engineers. Proceeding of Spring conference(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) Yamaguchi, 1980, "Turbulent Diffusion Flame in the Shear Flow," *Transaction of Japan Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 45, pp. 981~990.
- (8) Jeong, Y., G., Kim, K. C., Jeon, C. H., and Chang, Y. J., 2002, "The Effect of Swirl Intensity on Flow and Combustion Characteristics of Flat Flame Burner," *Transaction of Korea Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 26, No. 2, pp.336~344
- (9) Adrian, R. J., 1991, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 23, pp. 201~304.
- (10) Lee, Sang-joon, 1999, "PIV-Velocity Field Measurement," POSTECH.
- (11) Chang, T. P., 1985, "Image Processing of Tracer Particle Motion as Applied to Mixing and Turbulent Flow," *Journal of 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 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
- (14) Crosely, D. R., and Dyer, W. J., 1983, "Two-Dimensional Imaging of LIF of OH in a Flame," International Conference of Laser, '82 STS Press, pp. 752~760
- (15) Dyer, W. J. and Crosely, D. R., 1985,

"Fluorescence Imaging for Flame Chemistry,"
Proceeding of International Conference of Laser,
'84 STS Press, p.211

(16) Glassman, I., 1987, *Combustion*, 2nd Ed.,
Academic Press, Orlando.

(17) Reynolds, O., 1883, "An Experimental
Investigation of the Circumstances which Determine
Whether the Motion of Water Shall be Direct or
Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel
Channels," *Transaction of Royal Society of London*,
Vol. 174, pp. 935~982.

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

(19) Metghalchi, M. and Keck, J.C., 1982, "Burning
Velocities of Mixtures of Air with Methanol,
Isooctane, and Indolene at High Pressures and
Temperatures," *Combustion and Flame*, Vol. 48, pp.
191~210

(20) Abraham, J., Williams, F.A., and Bracco, F.V.,
1985, "A Discussion of Turbulent Flame Structure
in Premixed Charges," Paper 850345, SAE P-156,
Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.

(21) Choi, B. R., Chang, I. G., and Choi, G. M.,
1996, "Experimental Study on Flame Structure and
Combustion Characteristics of Turbulent Diffusion
Flame," *Transaction of Korea Society of Mechanical
Engineers*, Vol. 20, No. 3, pp. 1050~1060