

## 선회도에 따른 평면 화염 버너의 유동특성

정용기\* · 전충환\*\* · 장영준†

(2000년 2월 17일 접수, 2000년 5월 19일 심사완료)

### The Effect of Swirl Number on the Flow Characteristics of Flat Flame Burner

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

**Key Words:** Flat Flame Burner(평면화염버너), PIV(Particle Image Velocity), Swirl Number(선회도), CTRZ(중앙 재순환영역)

#### Abstract

Burner of Flat Flame type expects the uniform flame distribution and NOx reduction. The characteristics of Flat Flame Burner become different according to swirl number in the burner throat. Experiments were focused on swirl effect by four types of swirler with different swirl numbers (0, 0.26, 0.6 and 1.24). It shows many different flow patterns according to swirl number using PIV(Particle Image Velocimetry) method. The flow of burner with swirler is recirculated by pressure difference between its center and outside. Recirculated air makes stable in flame, and reduces pollutant gas. In case of swirl number 0, main flow passes through axial direction. As swirl number increased, The backward flow develops in the center part of burner and Flow gas recirculates. This is caused by radial flow momentum becomes larger than axial flow by swirled air and the pressure at center drops against surrounding. As swirl number increases, the radial and axial velocity was confirmed to be larger than low swirl number's. And turbulence intensity have similar pattern. The CTRZ(Central Toroidal Recirculation Zone) is shown evidently when  $y/D=1$  and  $S=1.24$ . The boundary-layer between main flow and recirculated flow is shown that the width is seen to be decreased as swirl number increased.

#### 기호설명

D	: 스로트 지름
S	: 선회도
u	: 반경방향 속도
U	: 반경방향 평균속도
Uavg	: 스로트 속도
$u_{rms}/Uavg$	: 반경방향 난류강도
v	: 축방향 속도
V	: 축방향 평균속도
$v_{rms}/Uavg$	: 축방향 난류강도
$Pxy_{,rms}$	: 유동장의 난류강도

#### 1. 서론

최근의 에너지 위기와 관련하여 에너지의 합리적인 이용뿐 아니라 환경 친화적인 연소 기술 개발에 대한 필요성으로 선진국에서는 이에 대응하는 구체적인 저공해 기술을 연구 개발하는데 박차를 가하고 있다. 대표적인 에너지 다소비 설비인 공업로에 적용되고 있는 연소기는 안정된 화염, 유해 물질의 배출 저감, 연소 효율의 향상 등이 매우 중요한 관건이다. 그 중 평면화염 버너(Flat Flame Burner)는 가스연료 분류 주위에 유입하는 공기에 강한 선회를 가하여 중심축상에 넓은 재순환 유동을 발생시키고, 이로 인해 고온의 연소가스가 역류함으로써 연료와 공기의 혼합이 촉진되어 넓은 연소 범위에 걸쳐서 안정된 고

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : changyj@hyowon.cc.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2332 FAX : (051)512-5236

부하 연소가 가능하다.<sup>(1,2)</sup> 또한 화염 면적이 증가하여, 화염온도가 낮아지고, 연소가스의 재순환으로 산소 농도가 낮아져 NOx가 저감되는 효과로 인해 평면화염 선회 연소기의 활용도가 점점 높아지고 있는 실정이다.

선회류 연소기의 연소특성에 미치는 중요한 요인중 하나는 선회도에 따른 재순환 영역의 구조와 경계이다. 재순환 영역의 유동형태를 예측하기 위한 많은 실험적 연구가 이루어져 왔다. Hiatt와 Powell은 피토크관을 이용하여 가스 터빈 연소실내의 유동장을 측정하였다.<sup>(3)</sup> 또한 Mathur, Maccallum 등도 3차원 구형피토크관을 사용하여 3차원 난류유동장을 측정하였으며 강선회류는 연소실 중앙부에 재순환영역을 발생시킴을 확인하였다.<sup>(4,5)</sup> Lee 등은 고부하 연소기의 유동장 특성에 관한 연구에서 연소실 팽창각에 따른 유동 특성과 선회도의 증가에 따른 재순환 영역의 축방향의 속도가 증가하는 것을 관찰하였다.<sup>(6)</sup> Aoki와 Nakayama는 LDV기법을 이용하여 스윙각도에 따른 난류강도와 재순환영역의 특성을 파악하였다.<sup>(7)</sup>

현재까지 선회도와 그에 따른 재순환영역에 대한 연구는 많이 이루어져 있지만, 유동의 흐름을 교란할 여지가 있는 피토크관을 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 동일한 지점의 유동장들을 앙상블 평균하여 연소기의 선회강도가 재순환 영역을 포함한 전체 유동장에 미치는 영향을 파악하였다.

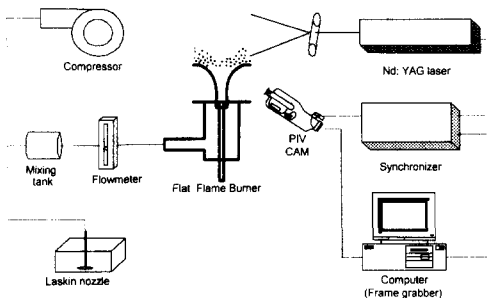


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

## 2. 실험장치 및 제목

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 평면화염 버너의 선회각에 따른 확대 유도관 전면부의 유동장을 측정하기 위한 실험장치도이다. 유동계측을 위한 PIV 장치는 이중 펄스 발생기(Nd : YAG 레이저)와 화상취득을 위해 1K×1K의 해상도를 가진 CCD카메라(PIVCAM 10-15)를 사용하였다. 레이저와 CCD카메라를 제어하기 위해 구동 드라이브(Synchronizer, TSI 610032)를 사용하였다.

Fig. 2는 연소기의 단면과 PIV화상을 취득하기 위한 측정영역을 나타낸다. 유동장을 관찰하기 위한 연소기는 아크릴로 제작하였으며, 중심으로부터 23mm떨어진 곳에서 한쪽면을 100×100mm로 계측하였다. 중심을 기준으로 유동이 축대칭이라는 가정하에 주유동, 재순환 영역, 그리고 경계영역의 유동패턴을 포함한 한쪽면의 화상을 획득

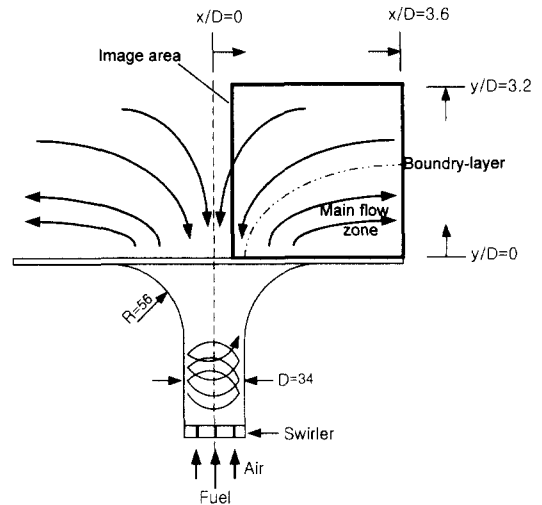


Fig. 2 Schematic of test section of combustor

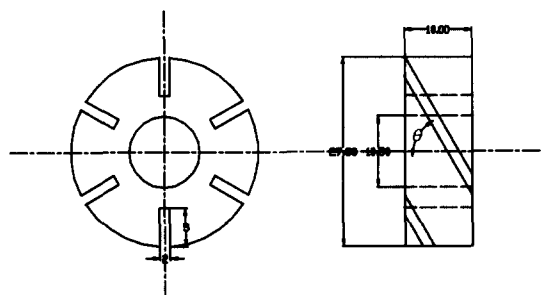


Fig. 3 Schematic diagram of swirler

특하였다.

Fig. 3은 베인 형태의 축방향 선회기의 구조를 나타낸다. 버너의 스롯직경은 34mm, 스롯 유도관 길이는 65mm, 꼭질 반경은 56mm이다. 버너의 전체적인 형상은 스롯 부분에서 점차적으로 직경이 확대되는 방사형 모양이다. 선회기는 출구 단면적 5×2mm, 6개로 구성되어 있고, 0, 0.26, 0.6, 1.24의 선회도를 갖는다.

2.2 실험방법

Table 1은 실제 버너 연소시에 적용되는 유량을 기준으로 한 본 실험의 조건이다. 실연소시 2600Kcal/h에 해당하는 유량 48 ℓ/min을 공급하였고, 선회각(θ)이 0, 20, 40, 60인 4개의 노즐을 사용하여 선회도를 0, 0.26, 0.6, 1.24로 변형시키면서 전체 유동장의 특성을 파악하였다. 여기서 선회수(S)는 무차원수로서 분류내의 각 운동량을 노즐 반경과 축방향 운동량을 곱해 나눈값으로 다음의 값으로 정의된다.<sup>(8)</sup>

$$S = \frac{G_{\phi}}{G_x \cdot d_2/2} = \left( \frac{2 \tan \theta}{3} \right) \frac{(1 - \sigma_r^3)}{(1 - \sigma_o^3)} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_r$ 은 선회기의 내경 ( $d_1$ )과 외경 ( $d_2$ )의 직경비이며,  $\theta$ 는 선회각도이다.

PIV기법을 이용한 속도벡터의 검출은 2프레임 상호상관기법을 이용하였다. 두 프레임 사이의 간격은 160μs로 일정하게 하고, 속도 벡터의 계산을 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 24×24픽셀로 50%의 겹침을 허용하였다. 즉 실제 속도벡터 간의 간격은 12픽셀이 된다. 후처리는 불량벡터의 제거, 보간, 양상불의 순서로 처리하였다. 각 선회도 별로 1000장의 화상을 취득하여 양상불 평균하였다.<sup>(9-14)</sup> 본 연구에서 난류강도의 정의는 반경 및 축방향 속도의 섭동 성분의 r.m.s값( $u_{rms}$ ,  $v_{rms}$ )을 스롯 출구의 속도( $U_{avg}$ )로 나눈값을 사용하였다. 그리고, 주유동과 주위 유입유동이 접촉하면서 두 유동이 평행하게 되어 정체되는(V=0) 경계영역의 특성을 파악하였다.

Table 1 Experimental conditions

Experimental items	Conditions
Volumetric air flow rate	48 (ℓ/min)
Swirl number(S)	0, 0.26, 0.6, 1.24
Air injection velocity in throat	0.88 (m/s)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 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 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 연소가의 유입으로 화염 온도가 저하되어 NOx의 발생이 감소하게 될 것이다.

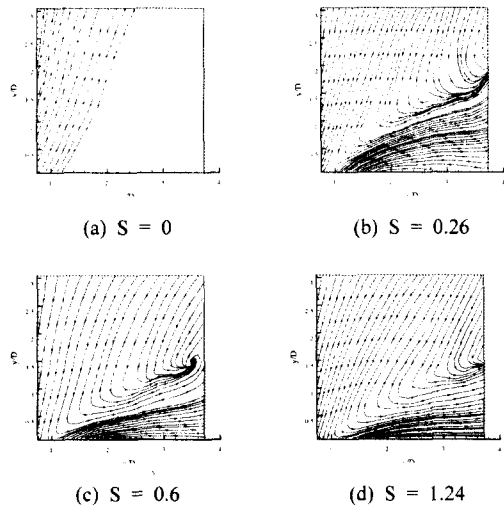


Fig. 4 Streamlines from ensemble averaged velocity in x-y distance ratio field with s=0, 0.26, 0.6 and 1.24

3.2 반경 및 축방향 속도분포

Fig. 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( $U/U_{avg}$ )를 나타내었다. (a)는  $x/D=1$ 인 지점(실제 중심에서 34mm)으로  $y/D$ 의 전 지점에서 대부분의 속도가 음의 값을 갖는다. 이것은 주위공기가 버너의 중심부로 유입되고 있는 것을 나타낸다. 선회도가 높을수록 음의 반경방향 속도가 선회도가 낮은 경우 보다 상대적으로 크게 나타났다. 이것은 버너의 중심과 외부의 압력구배가 커서 재순환 되는 유동의 속도가 커지기 때문이다. (b)는  $x/D=1.5$ 인 지점으로  $y/D$ 의 위치가 낮을수록 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( $U_{avg}$ )의 0.65 정도로 나타났다. (c)는  $x/D=2$ 인 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  $x/D=1.5$ 를 지나서

2, 2.5인 하류 지점으로 갈수록 운동 모멘텀의 감소로 인해 속도 변화가 완만해짐을 보인다.

Fig. 6은 버너의 축 방향 네 지점에서의 축방향 속도성분( $V/U_{avg}$ )을 나타낸 것이다. (a)는  $y/D=1$ 인 지점으로 선회유동의 영향으로 버너 축방향의 양의 속도는 없으며, 선회도가 높을수록 버너 중심을 향하는 음의 속도 성분이 더욱 크게 나타나고, 특히 선회도가 1.24인 경우에는 축 방향 최대 속도는  $-0.4$ 까지도 나타났다. 이것은 선회도의 증가로 버너의 중심부에 부압이 형성되고, 이로 인해 음의 속도가 증가하여 외부 유입공기에 의한 재순환 영역이 형성되는 것이다. (b)  $y/D=1.5$ , (c)  $y/D=2$ , (d)  $y/D=2.5$ 로 축 하류 방향으로 갈수록 유입속도가 전체적으로 감소하는 경향을 보이고, 선회도에 관계없이  $y/D=1$ 에서는  $x/D=2.5$  부근부터 축 방향 속도가 같아지고,  $y/D=1.5$ 에서는  $x/D=3.5$ 에서  $y/D=2.5$ 에서는 더욱 하류 반경 지점에서 같아진다. 스로트의 직경( $D$ )을 사용한 상대위치 4지점( $y/D=1, 1.5, 2, 2.5$ )에서 선회도에 따른 축방향 속도를 계속하여 음의 속도값을 갖는 재순환영역의 유동 패턴을 확인하였다. 연소기에 공급되는 연소용 공기는 선회도에 따라 선회운동을 하고, 선회류가 연소기 출구에서 분출됨에 따라 중심축 부근의 저압은 축방향의 압력 역구배를 형성시키며 축방향 운동에너지

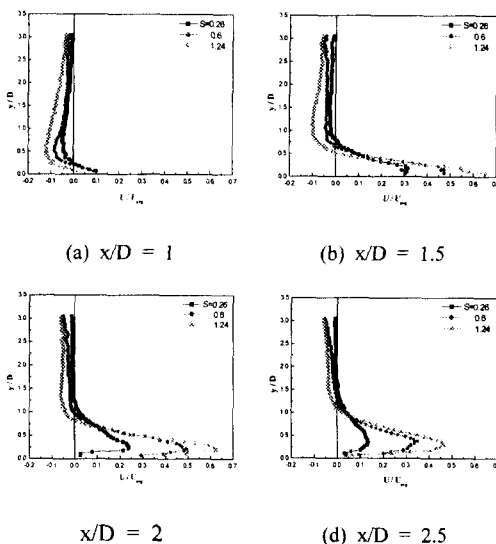


Fig. 5 Distributions of nondimensional radial velocity ratio with radial distance ratio,  $x/D$

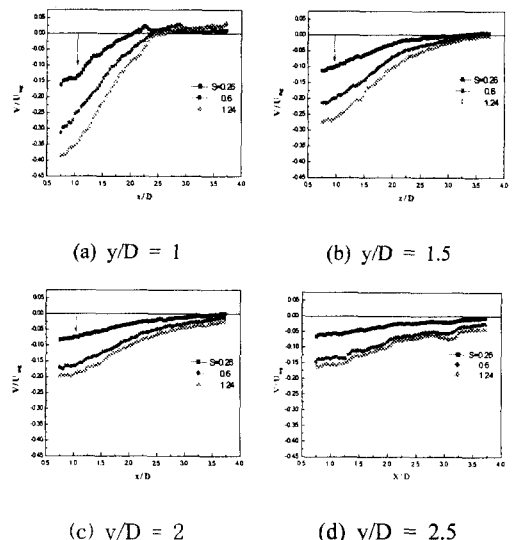


Fig. 6 Distributions of nondimensional axial velocity ratio with axial distance ratio,  $y/D$

가 역방향의 압력구배를 극복하지 못할 때 재순환 영역이 형성된다. 이러한 재순환 영역은 Toroidal Vortex의 형태를 취하므로 CTRZ(Central Toroidal Recirculation Zone)라 할 수 있다.<sup>(7)</sup>

3.3 난류강도(r.m.s.) 및 운동에너지

Fig. 7은 상대 위치 4지점(x/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 선회도에 따른 반경 방향 난류강도의 변화를 나타내었다. (a)는 x/D=1인 지점으로 y/D=1.5이하에서 난류강도가 커짐을 알 수 있다. 이 부분은 반경방향 음의 속도 성분이 지배하는 부분으로 버너 중심부로 유입되는 공기도 상당한 섭동량을 가지고 있는 것으로 나타났다. (b)는 x/D=1.5인 지점으로 반경방향 속도 분포와 비슷한 경향을 나타내고 있고, 속도 증가에 따른 난류강도도 커지는 것으로 나타났다. (c)는 x/D=2인 지점으로 반경방향 속도와 비슷한 경향을 보이며 마찰로 인한 속도감소가 나타나는 곳은 난류강도도 줄어드는 경향을 보인다. 반경방향 무차원 거리(x/D)가 증가할 수록 난류강도는 줄어들지만 선회도가 1.24인 경우는 다른 선회도와 비교하여 난류강도가 크게 나타났다. 이것으로 보아 선회도가 1.24인 경우가 연료와 공기와의 혼합이 잘 이루어질 것으로 예상된다.

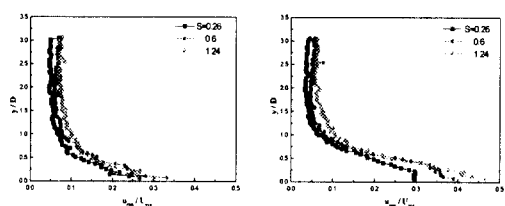
Fig. 8은 축 방향 속도의 난류강도를 4지점(y/D=1, 1.5, 2, 2.5)에서 선회도에 따라 나타내었

다. (a)는 y/D=1인 지점으로 축 방향의 난류강도는 x/D=2~2.5지점에서 가장 큰 값이 나타났다. (b)는 y/D=1.5인 지점으로 주 유동을 벗어난 곳으로 난류강도가 낮게 나타났다. 하지만 선회도가 0.26인 경우에는 주 유동의 폭이 크므로 x/D=2이상에서 주 유동의 이동 경로에 포함되어 있기 때문에 난류강도가 다시 상승하는 구간이 나타난다. (c),(d)는 y/D=2, 2.5인 경우로 중심으로 역류되는 축방향 유동에 의하여 중심부근의 난류강도가 크게 나타나고, 반경방향으로 멀어질 수록 난류강도가 약하게 나타났다.

Fig. 9는 반경 방향과 축 방향의 난류강도를 고려한  $P_{xy,rms}$  값을 나타낸 것으로  $P_{xy,rms}$ 을 다음과 같이 정의하였다.

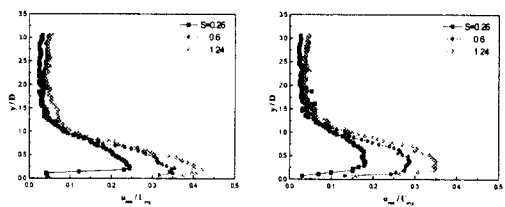
$$P_{xy,rms} = \frac{\sqrt{u_{rms}^2 + v_{rms}^2}}{U_{avg}} \quad (2)$$

$P_{xy,rms}$ 는 방향에 관계없이 전체 난류강도를 나타낸 것으로 선회도의 증가에 따라 유도관 중심부에서의  $P_{xy,rms}$  값이 높게 나타나고, 넓게 분포하는 경향을 나타내었다. 이것은 Fig. 7, 8에서 확인했듯이 이 영역에서는 반경·축방향의 r.m.s 값의 공존으로 인해  $P_{xy,rms}$  값이 모두 높게 나타난다. (a)는 선회도가 0.26인 경우로 중심에서는 높은 값을 나타내었고, x/D=1, y/D이상에서는 전체적으로 낮은 값을 나타내었다. (b), (c)는 선회



(a) x/D = 1

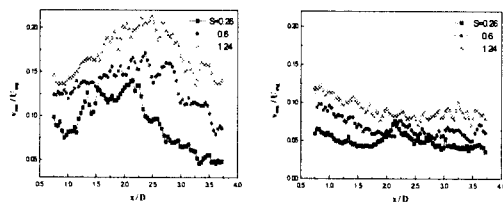
(b) x/D = 1.5



(c) x/D = 2

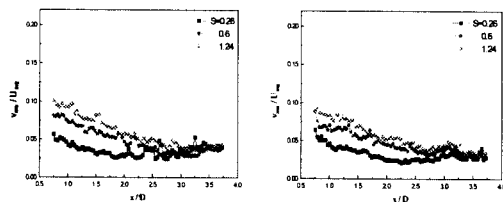
(d) x/D = 2.5

Fig. 7 Distributions of radial r.m.s. with radial distance ratio, x/D=1, 1.5, 2 and 2.5



(a) y/D = 1

(b) y/D = 1.5



(c) y/D = 2

(d) y/D = 2.5

Fig. 8 Distributions of axial r.m.s. with axial distance ratio, y/D=1, 1.5, 2, 2.5

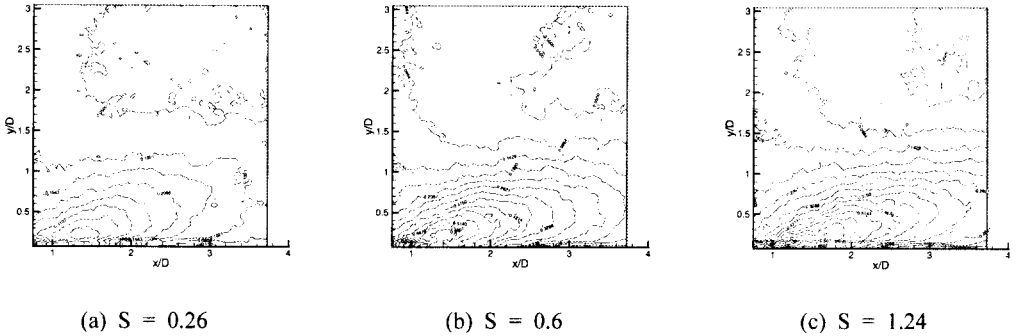


Fig. 9 Distributions of summation of radial and axial r.m.s. with  $S=0.26, 0.6$  and  $1.24$

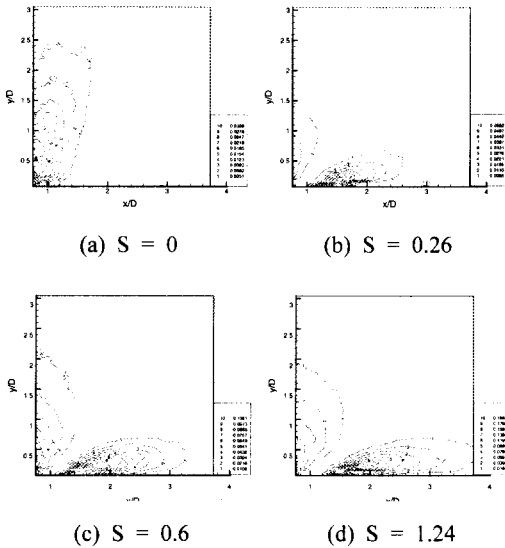


Fig. 10 Contours of mean kinetic energy with  $S=0, 0.26, 0.6$  and  $1.24$

도가 0.6, 1.24인 경우로 선회도가 증가할 수록 선회도가 0.26인 경우보다 같은 위치에서의  $P_{xy,rms}$  값이 크게 나타났다. 이것은 선회도의 증가에 따른 반경방향의 r.m.s. 값과 축방향의 r.m.s. 값이 모두 지기 때문이다. (c)에서는  $x/D$ 가 1인 지점에서  $y/D$ 의 전영역에 있어서  $P_{xy,rms}$  값이 0.1 이상을 유지하고 있다. 이것은 선회도가 1.24인 경우 축방향 속도의 증가로 상대적으로 다른 2가지 선회도에 비해 높게 나타난다.

Fig. 10은 유동장에서 선회도에 따른 운동에너지를 나타낸 것이다. (a)는 선회도가 0인 경우로 대부분의 운동에너지가 축방향으로 왕성하게 나

타나는 것을 보여주며, 버너 출구 부분에서 가장 큰 운동에너지 값을 나타내었다. 이러한 운동에너지는 축방향이 증가할수록 작아지며 거의 100mm ( $y/D=3$ ) 단면 이상에서는 거의 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. (b)는 선회도가 0.26인 경우로 축방향과 반경방향의 운동에너지가 공존하고, 운동에너지의 폭이 작은 것으로 나타났다. (b), (c), (d)에서 선회도가 증가할수록 운동에너지 분포도 증가하고, 운동에너지값도 증가하는 것을 보여주며, 선회도가 1.24인 경우는 최대 운동에너지값이 선회도가 0.26인 경우보다 약 4배가 증가하는 것으로 나타났다.

### 3.4 유동의 경계영역

반경방향 속도장으로부터 구한 데이터를 이용하여 속도가 0인 지점, 즉 주 유동과 유입되는 유동의 경계영역을 산출하였다. 이 유동은 주 유동과 유입되는 유동이 접촉하면서 유입유동의 방향이 주 유동으로 바뀌는 곳으로 주 유동과 유입공기의 경계영역이다.

Fig. 11는 주 유동과 유입되는 유동과의 경계영역을 나타낸 것으로 선회도에 따라 상이한 결과를 나타내었다. (a)는 선회도가 0.26인 경우로 속도가 거의 0인 경계영역이 반경방향으로 갈수록 넓게 분포하는 것을 보여주며, (b)와 (c)는 선회도가 0.6, 1.24인 경우로 반경방향으로의 폭이 선회도가 0.26인 경우보다 좁아지는 것을 보여준다. 선회도가 0.26인 경우의 면적을 기준으로 선회도가 0.6일 때는 73.7%의 면적 감소를 보였고, 선회도가 1.24인 경우에는 89.4%의 감소를 나타내었다. 이것은 선회도가 증가하면 주 유동과 유

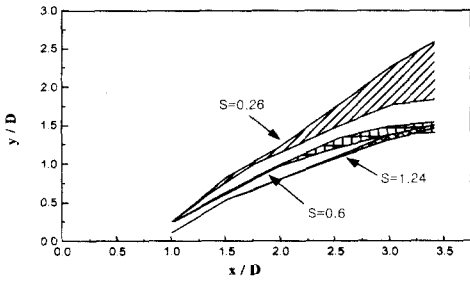


Fig. 11 Width of boundary-layer w.r.t. stagnation area with  $S=0.26, 0.6$  and  $1.24$

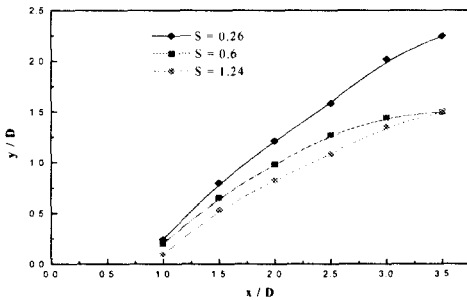


Fig. 12 Central line of boundary-layer with  $S=0.26, 0.6$  and  $1.24$

입공기와 유속의 차이가 커서 유입공기가 급격히 주 유동에 흡입됨을 나타낸다.

Fig. 12는 선회도에 따른 경계영역의 중심을 구한 것으로, 경계영역은 선회도가 증가할수록 버너의 벽면에 근접하여 형성되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 평면 화염 버너에 4가지 선회도를 가지는 배인형 선회기를 장착하여 PIV기법을 이용하여 선회도가 유동 특성에 미치는 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) 선회도에 따른 유선분포에서 선회도가 없는 직진 유동에 비하여 선회도가 증가할수록 반경 방향의 속도 성분의 증가로 주 유동이 버너 벽면에 근접하여 이동하고, 중심과 외부의 압력 차이로 인해 유입공기 유동이 버너 중심으로 역류하였다.

(2) 선회도가 클수록 반경 방향 속도는  $y/D=1$  이하의 벽면 근처에서만 증가하였고, 선회도가

1.24인 경우에  $x/D=1$ 에서 무차원 속도값 ( $U/U_{avg}$ )이 0.65로 가장 크게 나타났으며, 난류 강도도 이와 유사한 경향을 보였다.

(3) 축 방향 속도 성분은 버너 중심에서 속도 성분을 가지는 Toroidal 형태를 취하며 선회도의 증가에 따라 축 방향 무차원 속도값( $V/U_{avg}$ )은 증가하나 난류강도는 버너 벽면에서 멀어질수록 버너 중심에서 최대값을 갖는다.

(4) 주 유동과 유입공기 유동의 경계영역은 선회도의 증가에 따라 버너 벽면에 근접하고, 또한 그 경계영역의 면적이 감소하는 경향을 보인다.

#### 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) Hiatt, G.F. and Powell, G.E., 1962, "Three Dimensional Probe for Investigation to Flow Patterns," *The Engineer*, pp. 165~170.
- (4) 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.
- (5) Chaturvedi, M.C., 1963, "Flow Characteristics of Axisymmetric Expansion," *Proceedings, J. of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 89, No. HY3, pp. 61~92.
- (6) Sang-Nam Lee, Hyung-kee Yoon, Jeon-In RYU, 1996, "Flow Field Characteristics of a High Load Combustor," *KSMSE 96S151*, pp. 58~63.
- (7) Aoki, K and Nakayama, 1987, "The Flow Characteristics in Swirl type Combustor," *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*, pp. 45~54.
- (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."
- (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) Keane, R. D. and Adrian R. J., "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images, Flow Visualization and Image Analysis," *F.T.M. Nieuwstadt (ed.) Kluwer Academic Pub.*, pp. 1~25.
- (14) Yang, W. J., 1989, *Handbook of Flow Visualization*, Hemisphere Pub. Co.