

동축 반전 스월러의 플레어 각도변화가 스월러 유동에 미치는 영향 연구

김택현* · 김성돈** · 진유인*** · 민성기****†

*과학기술연합대학원대학교 무기체계공학과

** (주)터보헤드 · ***국방과학연구소 제4기술연구본부

Effect of Flare Angle in Counter-Rotating Swirler on Swirling Flow

Taek Hyun Kim*, Sung Don Kim**, Yu In Jin*** and Seong Ki Min****†

*Weapon System Engineering, Korea University of Science and Technology

Turbohead, *Agency for Defense Development

(Received 5 February 2016, Received in revised form 24 February 2016, Accepted 29 February 2016)

ABSTRACT

Swirler generates the overall swirling flow in the combustion chamber and this swirling flow governs the flame stability and enhances fuel atomization. This paper deals with the flare angle effects on flow streamlines, recirculation zone, Central Toroidal Recirculation Zone(CTRZ) and Corner Recirculation Zone(CRZ) in the model combustion chamber using counter-rotating swirler. 2D PIV system was employed to obtain the velocity components and test condition was obtained using Reynolds Analogy equivalent to air test. We observed transitional flow patterns of flare angle increased. The obtained results show that the flare angle controls the behavior of Recirculation zone, Central Toroidal Recirculation Zone and Corner Recirculation Zone.

Key Words : Swirling flow, Flare, Counter-Rotating, PIV system, Recirculation zone

기 호 설 명

Alphabets	V : Velocity
CTRZ : Central Toroidal Recirculation Zone	μ : Dynamic Viscosity
CRZ : Corner Recirculation Zone	D : Diameter
FA : Flare Angle	sw : Swirler
S_n : Swirl Number	hub : Hub
Re : Reynolds Number	θ_v : Vane Angle
ρ : Density	

1. 서론

연소실에서 스월러에 의해 발생된 선회 유동은 연료의 미립화를 촉진시키고, 연료의 분포와 유동의 재순환 및 난류를 강화시켜 화염 전체의 안정성을 높이는 역할을 한다[1,2]. 그리고 선회유동을 발생시

키는 스월러의 후단에 장착되는 플레어는 스월러에서 만들어 낸 선회 유동의 형태를 지배하여, 플레어가 형성시킨 최종 유동의 흐름에 따라 연소 유동장의 재순환 형태 및 액체 연료 미립화의 분포를 결정하여 연소화염의 형태를 결정하게 된다[3]. 따라서 플레어의 각도(Flare Angle)를 정하는 것은 연소실 내부를 설계할 때 스월러와 함께 우선적으로 고려되어야 하는 사항이다. 따라서, 최적화된 플레어의 각도는 연소화염 안정성을 향상시키고 연소기 성능을 높이는데 주요한 변수로 판단된다.

스월러 및 플레어의 형상에 따른 선회 유동 특성에 대해 E.Arun Raj, Thundil Karuppa Raj[4-5]은 스월

† Corresponding Author, skmin@add.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

베인 형상과 개수 조정을 통해 스윙 수(Swirl Number)를 변화시켜 와류 특성 및 속도 분포를 각각 PIV 기법과 CFD를 통하여 분석하였고 D.L Burrus, Kim DJ [6,7]은 스윙 각도 변화에 따른 분무 특성을 조사하여 연소 안정성과 배기물 생성과의 관계에 대한 연구를 수행하였다. H.Y Wang[8]은 플레어의 직경에 따른 스윙러 하류에서의 분무 특성과 선회 유동 형상 변화에 대한 연구를 수행하였다. 스윙러와 플레어 형상 변화 이외에도 Jin YI와 3명[9]은 연소실 폭의 변화에 따른 연소실의 선회 유동의 분포특성을 연구하였다.

이전 연구자들이 제시한 연구결과로부터 플레어의 형상변화는 연소실의 재순환 영역과 난류 특성을 조절할 수 있는 중요한 요소가 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 플레어의 각도 또한, 연소기 내부 선회 유동에 주요한 인자로 판단되어, 본 연구에서는 플레어의 각도별로 연소기 유동장의 특성을 조사하고자 하였다. 본 연구에서는 동축 반전 스윙러를 사용하였고, 리세스가 없는 플레어의 각도를 변화시키면서 유동장의 형태를 관찰하였다. 연소실 유동장의 계측은 2차원 속도장을 측정하기 위해 PIV (Particle Image Velocimetry) System을 이용하였다. 이러한 계측을 통하여 연소실 내부의 CTRZ, CRZ의 형성 위치 측정을 통하여 플레어 각도가 유동장 형성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 구성 및 실험방법

2.1. 실험장치 구성

플레어 각도 변화에 따른 선회 유동 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 수류 시험 장치를 구성하였

다. 실험에 사용된 유체는 증류수이고, 증류수를 저장하고 있는 수조에는 2개의 펌프가 장착되어 있으며, 미세 유량 조절은 Bypass 밸브의 유량 조절을 통하여 수행하였다. 2개 펌프 모터의 출력 조절을 통해 실험 요구 유량을 모델 연소기 스윙러에 공급하였다. 수조, 정체실, 스윙러가 장착된 모델 연소기로 공급된 물은 회수 배관을 통해 수조로 순환되도록 구성하였다.

2.1.1. 모델 연소기 시험부

Fig. 2에는 모델 연소기 조립체를 보여준다. 모델 연소기는 환형 연소기의 인젝터 스윙러 섹션 1개를 모의하여 아크릴 소재로 제작하였다. 연소기의 크기는 156 × 156 × 300 mm로, 선회 유동을 생성시키는 스

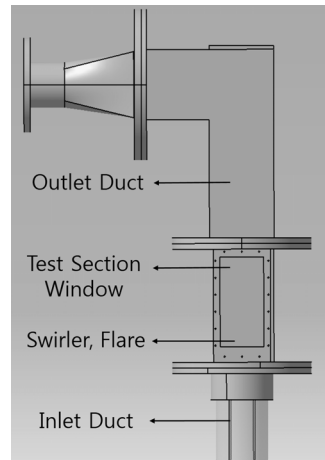


Fig. 2. The model combustor assembly.

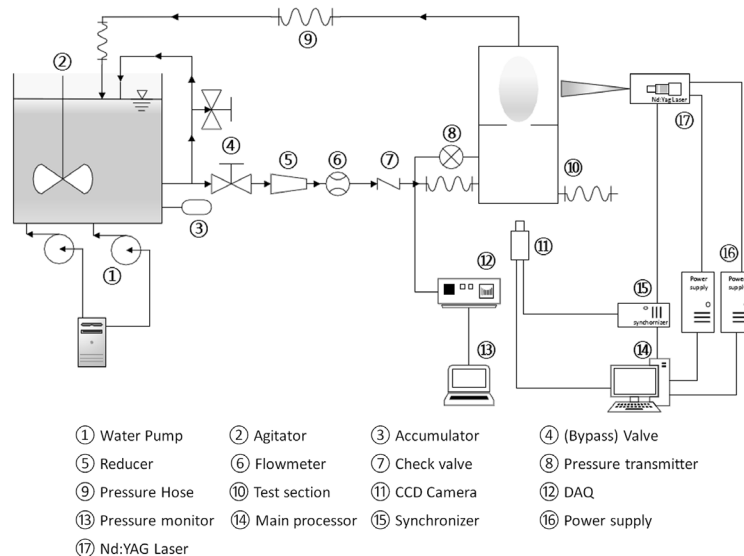


Fig. 1. Schematic diagram of water test rig set-up.

월러를 연소실 하단부에 장착하였으며 플레어는 모델 연소기 단면적과 동일한 정사각형 플레이트의 중앙에 구형하였다. 증류수는 하단부 원통형 정제실 입구 덕트로 들어와서 연소기 출구 덕트로 배출되도록 했다. Particle Image Velocimetry 시스템을 이용하여 속도벡터를 측정하기 위해 Charge Coupled Device (CCD) Camera가 촬영되는 정면부와 Nd:YAG Laser Sheet Beam을 조사하기 위한 측면부는 광학창으로 구성하였다.

2.1.2. 스월러와 플레어

본 연구에서 사용한 스월러와 플레어의 기하학적 형상은 Fig. 3에 보이는 바와 같다. 스월러는 동축 반전 스월러로, 연료의 미립화를 증가시키기 위한 내부 스월러와 연소실 내부의 화염 안정성을 높이기 위한 외부 스월러를 갖고 있다[11]. 스월러 베인 출구각도로 내부 스월러는 40°, 외부 스월러는 45°가 되도록 제작하였다. 스월러 베인 익형은 곡선형으로 평판형 베인보다 공력적 특성이 우수하여 낮은 손실 계수를 갖는 곡선형으로 제작하였다[3]. 베인의 개수는 내, 외부 스월러 모두 12개로 구성하였으며 내부 스월러의 선회 유동 회전 방향은 시계방향, 외부 스월러는 반시계방향의 선회유동 회전방향을 가진다. 선회 유동의 특성을 결정짓는 스월러의 선회수 (Swirl Number)는 식 (1)로 정의하였다[1].

$$S_n = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_{hub}/D_{sw})^3}{1 - (D_{hub}/D_{sw})^2} \right] \tan\theta_v \quad (1)$$

본 연구는 수류 유동장을 형성하여 유동의 특성을 조사하기 위한 연구이다. 압력변화에 따라 밀도 변화가 크게 일어나는 압축성 유체인 공기에 비해, 물은 압력변화가 있어도 밀도 변화가 거의 일어나지 않는 비압축성 유체에 해당된다. 비압축성 유체인 물을 이용하면 유동의 불안정성을 지배하는 지배 주파수 등의 비정상상태 요소들이 감소하게 되고,

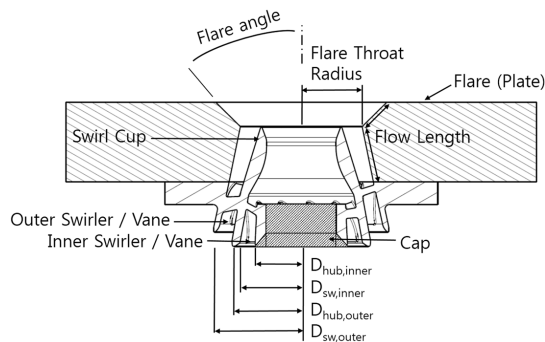


Fig. 3. Geometry of swirler and flare.

Table 1. Dimensions of Extended Swirler

	Inner	Outer
D _{sw} (mm)	39.6	48.4
D _{hub} (mm)	30.2	36.2
Vane angle (°)	40	45
Vane number (개)	12	12
Vane thickness (mm)	2	2

이를 통해 유동의 동력학적 특성을 보다 명확히 관찰할 수 있게 된다. 압축성 공기와 비압축성 물의 상사성을 고려하기 위해 레이놀즈수를 상사법칙의 기본인자로 설정한다. 그리고 지배주파수로부터 얻어지는 스트로할수(Strouhal number)를 이용하여 두 매질 간의 상사성을 확인할 수 있다[12,13].

동일한 실험조건에서 진행하였을 때 물을 이용한 실험이 공기를 이용한 실험 보다 상대적으로 진행 속도가 감소하게 된다. 따라서 공기로 실험한 조건에서 구한 레이놀즈수와 동일한 값을 가지게 되고, 이 값을 이용하여 상사성 구현을 하기 위해 동축 반전 스월러 크기를 1.5배 크게 하였다. 확대된 스월러 제원을 이용하여 구한 스월러의 선회수는 내부 스월러가 0.743, 외부 스월러가 0.880으로 원래 형상과 동일한 값을 가지도록 하였다. Table 1에는 확장한 스월러의 제원을 나타내었다.

스월러는 ABS 수지로 제작하였고, 쾌속조형기를 이용하여 제작하였다. 연소실에는 스월러와 노즐이 함께 장착되어 노즐에서 연료가 분무되고 스월러에 의해 선회 유동을 만들어지면서 유동 분포가 나타나게 된다. 하지만 본 연구에서는 동축 반전 스월러에 의해 생성된 선회 유동이 플레어 각도가 변함에 따라 형성되는 분포를 관찰하기 위한 것으로 노즐을 장착하는 동축 반전 스월러의 중앙부는 캡으로 막아 해당 영역으로 유동이 통과하지 못하도록 하였다.

플레어는 각도는 0°, 15°, 25°, 35°, 45°, 55° 총 6가지로 제작하였다. 플레어의 목반경(Flare Throat Radius)을 일정하게 하여 플레어 입구부에서의 스월 강도는 일정하도록 하였으며, 플레어의 유로의 길이 (Flow Length)도 동일하게 설정하였다.

2.1.3. Particle Image Velocimetry(PIV)

PIV 기법은 유동장에 Seeding Particle을 투입하고 평면의 레이저 광원에 의해 반사된 Particle 영상을 CCD High Speed Camera로 추적하여 유동의 방향과 속도를 계측하는 것이다[10]. 레이저 광원은 Double Pulse Nd:YAG Laser (Big Sky Laser Co., 140 mJ/pulse, 14.5 Hz)을 이용하였으며, 이미지 영상은 PowerView(4 mP) Camera (2048 × 2048, 16 frames/sec)를 통해 획득하였다. Seeding Particle은 HGS(Hollow Glass Seed-

ing)을 사용하였으며 입자의 직경은 10 μm , 밀도는 1.1 g/cm^3 이다. Double Pulse Nd:YAG Laser에서 발진하는 두 빔 사이의 시간 간격(Δt)은 32 \times 32 픽셀로 지정한 상호상관영역 내에 입자가 움직이는 거리 및 개수를 고려하여 110 ms으로 설정하였다.

레이저 시트는 모델 연소기 측정 부의 중심 축상 단면에 조사하도록 설정하였고, 레이저 빛에 의해 Seeding Particle에서 산란된 두 번의 Mie 신호를 수광부에 있는 2,048 \times 2,048 해상도 CCD High Speed Camera에서 각각 한 번씩 연속 동기화 하여 두 프레임으로 촬영하였다. 이 두 장의 이미지를 이용하여 상호상관기법을 적용하였고 최종적으로 상호상관영역 내의 입자의 속도를 산출하였다. 데이터처리 프로그램은 Insight 4G를 이용하였고, 이미지는 연속촬영모드를 이용하여 플레어 각도 별로 200장씩 촬영하였다. 획득한 이미지는 Matlab으로 작성한 프로그램을 이용하여 이미지 평균화작업을 하였다.

2.2. 실험 조건 설정

실험 조건 설정은 본 연구 이전에 수행된 공기를 이용한 스월러의 입 출구 양단에 걸리는 압력 강하량(ΔP) 변화에 따른 유량 데이터(Air Flow Rate)를 기준으로 하였다[11]. 압력 강하량(ΔP)은 식 (2)와 같이 정의하였으며 이 때, P_1 은 모델 연소실 입구압력, P_2 는 대기압을 나타낸다.

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2)$$

이 유량 데이터를 기준으로 레이놀즈수를 계산하였고 계산된 값을 상사법칙으로 적용시켰다. 레이놀즈수를 계산하는 과정에서 특성 길이 D는 스월러의 출구 직경을 적용하였다.

Table 2에는 공기로 실험한 스월러 입출구 양단의 압력 강하량에 따른 유량 데이터와 모델 연소기 크기를 기준으로 계산된 물 유량 값(Water Flow Rate), 그리고 상사법칙으로 적용되는 레이놀즈수를 나타내었다. 스월러 입 출구 양단에 걸리는 압력 강하량이 존재하지 않을 때와 비교하여, 압력 강하량이 증가하면서 나타내는 선회 유동장의 분포를 살펴보기

Table 2. Reynolds Analogy

$\Delta P(\%)$	Air flow rate (kg/h)	Water flow rate (kg/h)	Reynolds number
2	37	3276	3.1×10^4
4	54	4775	4.5×10^4
6	67	5891	5.6×10^4

위해 Table 2와 같이 ΔP 를 2, 4, 6%로 설정하였다. 그리고 본 연구에서는 압력 강하량이 6%일 때를 기준으로 상사된 $Re = 56000$ 을 실험조건으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 모델 연소기 내부의 유동 분포

Fig. 4에는 플레어 각도가 0°일 때를 기준으로 $Re = 56000$ 에서의 Total velocity magnitude 분포를 나타내었다. X는 모델 연소기 수평방향, Y는 모델 연소기 수직 방향으로 플레어의 목직경 D로 나누어 길이를 무차원화를 하였다.

중앙에 형성된 CTRZ는 모델 연소기의 벽면을 따라 흐르는 선회 유동으로 인하여 축 방향 속도가 연소실 중앙부에 형성되는 속도 차이에 의한 압력 구배로 인하여 재순환 유동이 형성된 것으로, 스월러 출구 후방의 중앙 영역에 형성된다[3]. 이 외에도 플레어 면을 타고 진행한 유동이 모델 연소기 벽면에 만나는 벽면 유동(Wall flow) 경계의 하단부에서 코너 재순환 영역(CRZ)이 생성 된다.

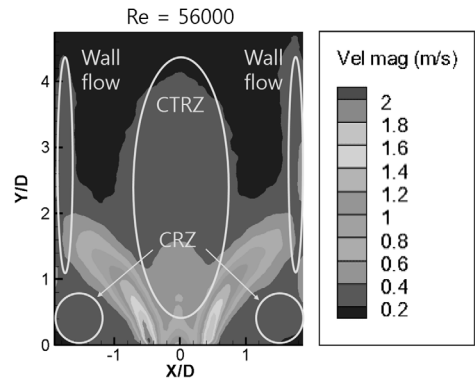


Fig. 4. Total velocity magnitude of swirling flow in the model combustor with $Re = 56000$ ($FA = 0^\circ$).

3.2. 플레어 각도변화에 따른 유동 분포

Fig. 5에는 축 방향 속도 분포를 Streamline과 함께 나타내었다. 플레어 각도가 0°에서 55°까지 변화면서 모델 연소기 내부에 형성된 Streamline을 통해 재순환 영역 중심의 위치가 플레어 각도에 따라 변화를 확인할 수 있다. 플레어 각도가 0°에서 25°까지는 $Y/D = 2.6 \sim 3.0$ 에서 재순환 영역의 중심이 형성되었다. 또한, 코너 부분에서 발생하는 CRZ의 중심은 모두 $Y/D = 0.8$ 에 형성되었다.

플레어 각도가 35°에서 55° 범위에 대해서는 축 방향 속도 분포가 플레어 각도 25° 이하인 경우와 다르게 CRZ가 형성되지 않았다. 35°에서 재순환 영역의 중심 위치는 모델 연소기 상류부로 내려온 $Y/D =$

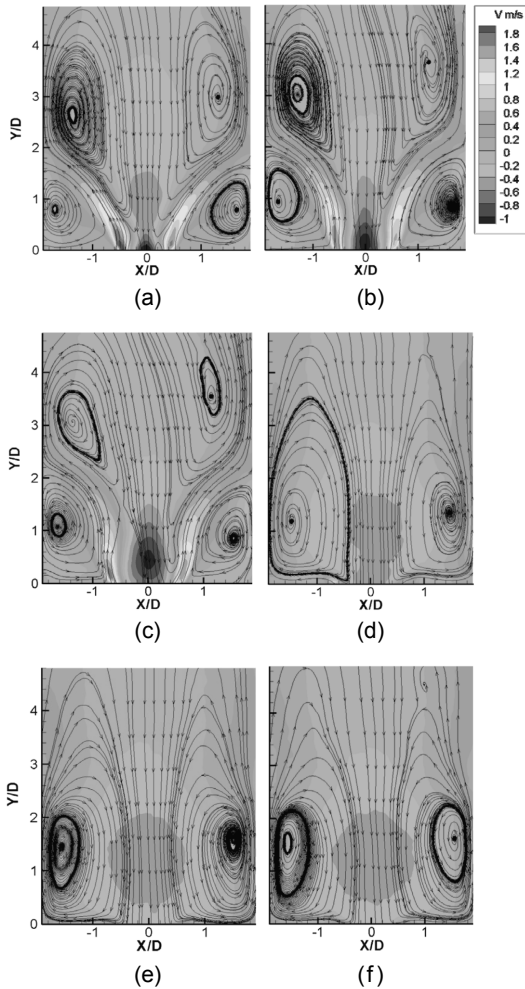


Fig. 5. Axial velocity contours with streamline at $Re = 56000$: (a) $FA = 0^\circ$; (b) $FA = 15^\circ$; (c) $FA = 25^\circ$; (d) $FA = 35^\circ$; (e) $FA = 45^\circ$; (f) $FA = 55^\circ$.

1.2에서 형성되었다. 45°, 55°에서는 다시 모델 연소기 하류부로 조금 상승하여 $Y/D = 1.4$ 에서 형성되었다. 45°와 55° 플레어만을 비교하였을 때는 재순환 영역 중심의 위치 변화에 큰 영향은 없었다.

Fig. 6은 플레어 각도 변화에 따른 반경 방향 속도 성분을 보여준다. 플레어 각도가 0°에서 15°로 변화하면서 $Y/D = 0.2 \sim 1.8$ 까지 형성되었던 반경 방향 최대 속도 위치가 25° 이상의 플레어 각도에서부터 플레어 출구면($Y/D = 0$), 즉 연소기 돔 벽에서 최대의 반경 방향 속도를 갖고 있음을 보여주었다. 따라서, 플레어 각도가 35° 이상이 되면 반경 방향의 최대 속도는 연소기 상류부로 이동하여 최종적으로는 돔 벽으로 이동된다. 또한 플레어 각도 증가에 따라 돔 벽을 따라 생성된 최대 속도 값 또한 증가됨이 확인되었다.

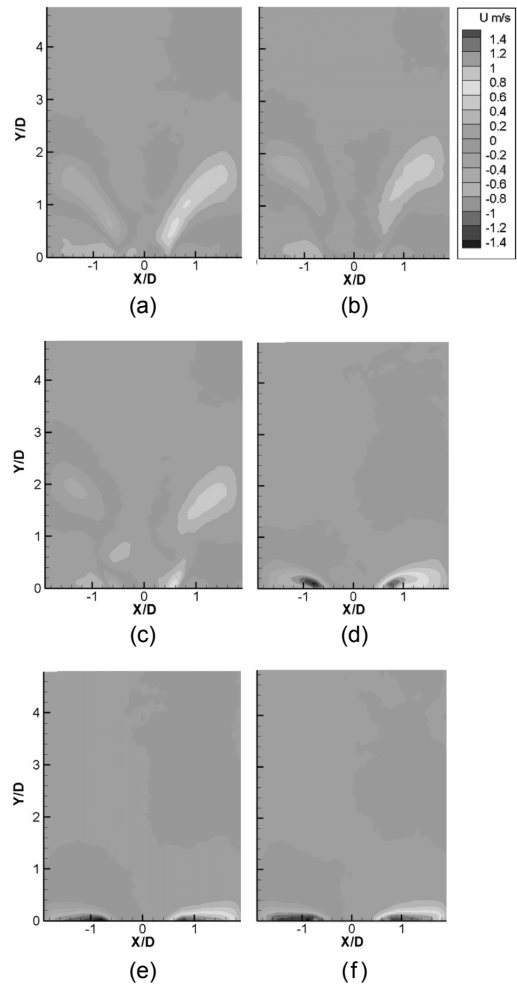


Fig. 6. Radial velocity contours at $Re = 56000$: (a) $FA = 0^\circ$; (b) $FA = 15^\circ$; (c) $FA = 25^\circ$; (d) $FA = 35^\circ$; (e) $FA = 45^\circ$; (f) $FA = 55^\circ$.

Fig. 5와 6을 통해 CRZ 형성의 특징을 확인할 수 있다. 플레어 각도가 0°에서 55°까지 증가하면서 연소기 내부 유동장의 스월러 유동의 축 방향 속도 성분은 감소하였고 반경 방향 속도 성분은 증가하였다. 이로 인하여 25°에서 35°로 플레어 각도가 증가하면 축 방향 속도보다 반경방향 속도의 영향이 우세해지고 CRZ의 형성을 억제함을 알 수 있다. 따라서 본 연구 대상의 스월러인 경우, 25°~35°의 플레어 각도가 CRZ 형성에 대한 임계각도인 것으로 판단된다. 그리고 플레어 각도가 35° 이상에서는 CRZ가 형성되지 못하고 모델 연소기 하단부인 돔 벽을 따라 흐르는 유동구조를 보였다.

또한 본 연구에서 사용된 플레어는 목반경(Flare Throat Radius)과 유로 길이(Flow Length)를 동일하게 정했기 때문에 0°에서 55°까지 각도가 증가하면서

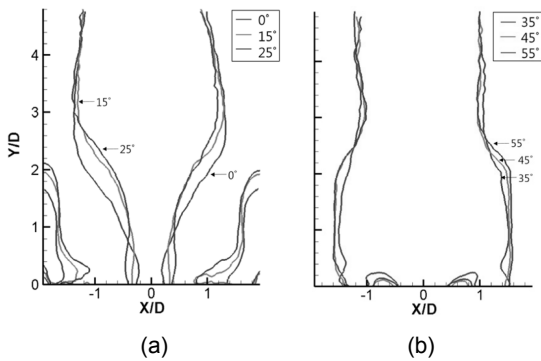


Fig. 7. Composition of CTRZ shapes at $Re = 56000$: (a) $FA = 0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$; (b) $FA = 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$.

플레어 출구 면적이 증가하게 된다. 축 방향으로 유동이 진행함에 따라 축 방향 속도가 감소하여 상대적인 스윙 강도가 증가된다. 따라서 플레어 출구 면에서 스윙 유동의 강도 차이에 따라 Fig. 5와 6에서 보이는 모델 연소기 내부 유동장의 CTRZ, CRZ 형성과 관계가 있음으로 볼 수 있다. 즉, 플레어 출구 면에서 스윙 강도가 유동장을 지배하고 있다고 생각된다.

Fig. 7은 $Re = 56000$ 조건에서 플레어 각도 변화에 따른 CTRZ를 형성하는 경계면인 절대속도 0인 경계선을 나타내었다. 플레어 각도가 0° 일 때는 모델 연소기 하류부에서 넓게 분포하는 모양이며 모델 연소기 상류부로 내려갈수록 CTRZ가 좁아지는 모양을 보였다. $15^\circ, 25^\circ$ 에서는 0° 에서의 형태와 비교했을 때, 중앙부에 나타내는 면적의 크기는 작아지고 벽면 쪽에서 나타나는 CTRZ의 영역이 증가하였다.

$35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 각도에서는 CTRZ의 형태가 넓게 분포하는 영역이 모델 연소기 하류부에서 상류부로 내려오면서 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ CTRZ 형태와는 다른 것을 알

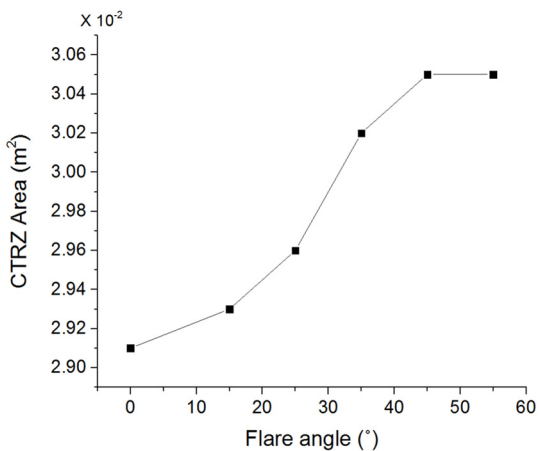


Fig. 8. Effect of flare angle on the area of CTRZ.

수 있다. Fig. 7에서 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 인 경우에 모델 연소기 상류부 벽면 쪽에 재순환 영역인 CRZ가 형성됨을 보여준다.

Fig. 8에는 Fig. 7에서 나타내었던 CTRZ 영역의 면적을 분석한 결과이다. 플레어 각도가 증가할수록 CTRZ 영역이 증가하였고 25° 와 35° 사이의 각도에서 CTRZ 영역의 변화 폭이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 의 각도 변화와 대비하여 $35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 의 각도 변화에 의한 CTRZ 형상과 면적에는 큰 변화가 없었다.

4. 결론 및 향후계획

본 연구 결과를 통해 플레어의 각도변화에 따라 모델 연소기 내부의 스윙러 유동 특성을 조사하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 플레어 각도가 25° 이하인 경우, 재순환 영역 중심이 모델 연소기 하류부에 위치하며 35° 이상으로 증가될 때 재순환영역 중심의 위치가 모델 연소기 상류부로 이동한다.

2) 또한, 플레어 각도가 0° 에서 25° 범위에 대해서 반경방향의 최대속도 영역이 하류의 벽면까지 연장되는 반면, 35° 이상인 경우 연소기 바닥면인 돛벽에 최대 반경방향 속도영역이 형성된다. 이에 따라 CRZ의 형성유무가 결정된다.

3) CTRZ는 $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 의 플레어각도인 경우 $35^\circ, 45^\circ, 55^\circ$ 의 플레어인 경우와 서로 다르며 이에 대한 임계각도는 25° 와 35° 범위에 존재한다. 이러한 임계 각도를 경계로 CTRZ의 중심위치 및 CRZ 유무가 결정되며 이는 플레어 임계각도인 25° 와 35° 범위에서 플레어 출구면에서의 축 방향속도와 스윙 속도의 비인 스윙 강도의 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

4) 플레어 임계각도 이상인 35° 보다 큰 범위에서 대해서는 플레어 각도가 증가하여도 재순환 영역의 분포와 CTRZ 형태 및 CTRZ 중심위치의 변화는 크지 않는다.

플레어 각도가 변하면서 재순환 영역중심이 형성되는 위치와 크기, 속도의 크기와 분포, CRZ의 형성에 직접적인 영향이 있음을 확인하였다. 따라서 연소기 내의 화염형성 및 연료의 미립화를 설정 혹은 설계하기 위한 플레어의 최적각도가 적용된 스윙러에 따라 존재할 수 있음을 본 연구를 통하여 알 수 있었다. 추후 플레어의 최적각도를 구체적으로 확인하기 위해, 25° 와 35° 범위 내의 플레어를 추가 제작하여 후속 연구를 수행할 예정이다. 또한 동축 반전 스

윌러가 만들어내는 재순환 영역 분포에서 비대칭성을 관찰할 수 있었는데, 이러한 비대칭성이 어떤 인자를 통해서 생성되는지를 스윌러의 형상변화, 플레어 리세스 길이의 유무 및 형상변화, 연소실의 형상변화 등을 통해 추가 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 방위사업청 선도형 핵심기술 개발과제 ‘장수명 고부하 연소기 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Gupta, A. K., Lilly, D. G. and Syred, Swirl Flows in Combustion : A review, *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 8 (1977), 1063-1078.
- [2] Philip Kiameh, *Power Generation Handbook*, 2nd edition, McGraw-Hill 2002, 12.1-12.22.
- [3] A.H. Lefebvre, and D.R. Ballal, *Gas Turbine Combustion*, 3rd edition, CRC Press 2010, 15-18.
- [4] E.Arun Raj, R.I Sujith and S.R. Chakravarthy, Investigation of the Effect of Degree of Swirl on Swirl Flow Characteristics Using PIV, 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry, August 25-28, 2009, PIV-09.
- [5] Thundil Karuppa Raj, R. and Ganesan, V. , Study on the Effect of Various Parameters on Flow Development, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, 2008, 1204-1225.
- [6] D.L Burrus, C.A. Chahrour, H.L. Foltz, P.E. Sabla, S.P. Seto and J.R. Taylor, *Combustion System Component Technology Performance Report*, NASA CR-168274, 1984, 135-143.
- [7] Kim DJ, The Effects of Swirlcup Geometry on Spray Characteristics in Gas Turbine Combustor, Ms.D Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering Seoul National University, 2002, 26-52.
- [8] H.Y. Wang, V.G. McDonell, and S. Samuelsen, Influence of Hardware Design on the Flow Field Structures and the Patterns of Droplet Dispersion: Part I, *J. Eng. Gas Turbines Power* 117(2), 1995, 282-289.
- [9] Jin YI, Kim TH, Ryu GW, Kim YR, Flame Visualization of a Model Gas Turbine Combustor Using a Counter Rotating Swirler with respect to Dome Height, The 44th Conference on Korean Society of Propulsion Engineers, 2015.05, 472-475.
- [10] Omprakash Yadav and Pradeep Gaikwad, Swirling Flow Visualization in a Square Section Test Duct by Particle Image Velocimetry (PIV) System, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Volume 4, Number 2, 2014, 175-18.
- [11] Jin YI, Ryu GW, Kim TH, Kim YR, Min SK, A Study on Combustion Phenomena with respect to Air Excess Ratio of the Gas Turbine Model Burner, The 43th Conference on Korean Society of Propulsion Engineers, 2014.12, 33-38.
- [12] Wessam Estefanos, Samir Tambe, San-Mou Jeng, A Study of the Mean and Dynamic Behavior of the Swirling Flow Generated by A Counter Rotating Radial-Radial Swirler Using a Water Test Rig, *Proceedings of ASME Turbo Expo June 15th-19th, 2015*, GT2015-43464.
- [13] C.E. Cala, E.C. Fernandes, M.V. Heitor, S. I. Sh-tork, Coherent structures in unsteady swirling jet flow, *Experiments in Fluids*, 40, 2006, 267-276.