

## 스윌러 플레어 출구길이가 모델 챔버내 유동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

유경원<sup>a,b</sup> · 진유인<sup>a</sup> · 김용련<sup>a</sup> · 김홍집<sup>b,\*</sup>

### An Experimental Study on the Effect of Swirler Mass Flowrate and Flare Exit Length on Flow Patterns inside a Model Combustor Chamber

Gyong Won Ryu<sup>a,b</sup> · Yu In Jin<sup>a</sup> · Yeong Ryon Kim<sup>a</sup> · Hong Jip Kim<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>Agency for Defense Development, Korea

<sup>b</sup>Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

\*Corresponding author. E-mail [khongjip@cnu.ac.kr](mailto:khongjip@cnu.ac.kr)

#### ABSTRACT

A swirler is a flame holding device generating recirculation regions in a gas turbine combustor, and the flow pattern due to a swirler has major effects on the flame distributions, combustion efficiency, and characteristics of exhaust gas. An experimental study for a counter-rotating swirler has been conducted to find out effects of the mass flow rate ratio of the inner/outer swirler flow area, the pressure difference between the swirler inlet and outlet, and the flare exit length ratio on the flow patterns in a model combustion chamber by using PIV(Particle Image Velocimetry) technique.

#### 초 록

스윌러는 가스터빈 연소기내에 재순환영역을 형성시켜 보염역활을 수행하는 기구로 스윌러에 의해 형성된 유동패턴은 연소실내 화염의 분포, 연소 효율, 배기가스등의 연소기 성능을 크게 좌우한다. 본 연구에서는 counter-rotating 스윌러에 대해 입자영상유속계(Particle Image Velocimetry)를 이용하여 바깥쪽 스윌러와 안쪽 스윌러의 유량비가 다른 2종의 스윌러 대한 스윌러 양단 압력 차 변화 및 플레어 길이비에 따라 변화하는 모델 챔버내의 유동형태를 실험적으로 고찰하였다.

Key Words: Combustor(연소기), Swirler Flare(스윌러 플레어), CTRZ(중앙 재 순환 영역), CRZ(코너 재 순환 영역), PIV(입자영상유속계)

Received 1 December 2015 / Revised 23 September 2016 / Accepted 29 September 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

#### 1. 서 론

가스터빈 연소기 주연소 영역(Primary

Combustion Zone)에서의 화염형상과 연소 안정성은 연료노즐로부터 분무된 연료액적, 연소기 돔(Combustor Dome) 및 주 공기홀(Primary Hole)로부터 유입되는 공기와의 혼합형상에 의해 좌우된다. 연소기 돔에 장착된 스윙러로부터 형성된 주 재순환 영역(CTRZ, Central Toroidal Recirculation Zone, 이하 CTRZ)은 연소된 높은 온도의 가스를 재순환시켜 반응영역으로 새롭게 유입되는 공기와 연료를 혼합시킴으로써 화염의 보염 역할 및 연속적인 점화원으로서의 기능을 수행한다.[1] Counter rotating 스윙러는 서로 다른 방향으로 스윙유동을 발생시키는 두 개의 유로로 구성되어있으며 연소기 돔 후방에 재순환 영역을 형성시킴으로서 화염을 보염시키는 역할을 수행한다.[1] 플레어(Flare)는 스윙러에서 유출되는 혼합공기를 팽창시키는 유로로, 노즐에서 분사되는 연료가 플레어로부터 형성된 공기의 흐름에 의해 미립화를 촉진시키고 최종 분무각의 형태를 결정하는 것으로 알려져 있다.[1] 따라서 플레어의 형상은 연소기 공력 설계시 스윙러의 형상과 더불어 우선적으로 고려되어야 하며, 연소기의 돔폭(Dome Width) 및 counter-rotating 스윙러내 벤츄리에서 분출되는 연료 분사각과 밀접한 관계가 있다.

Wang[2]은 플레어 형상(수축/팽창)을 변화시켜 가며 스윙러 하류에서의 유동분포와 분무형상을 계측하여 플레어 형상에 따라 유동과 분무형태가 매우 상이함을 보였다. Estefanos[3]은 고속 PIV(Particle Image Velocimetry, 이하 PIV)를 이용한 수류시험에서 플레어각의 변화에 따른 비정상상태 유동을 계측하여 CTRZ의 길이와 크기가 플레어 각이 커질수록 증가함을 보였다. Burrus[4]의 실험에서도 스윙러에 의해서 형성되는 재순환 유동형상이 스윙러 플레어의 출구각도에 의해 결정됨을 보였다. Mohammad[5]는 단일 섹터 연소기를 이용하여 스윙러 유동과 주공기홀 유동에 의한 연소실 내부의 유동 구조를 조사하였다.

이전 연구자들이 제시한 바와 같이 스윙러 플레어의 형상 및 출구각도는 연소기내 재순환영역의 형상과 재순환 유동을 크게 결정하는 요소

임을 알 수 있다. 본 연구는 axial counter-rotating swirler를 적용한 모델 연소기에 대하여 광학계측기법인 PIV를 이용하여 모델 연소기내의 속도장을 계측함으로써 스윙러 플레어 각이외의 설계변수인 안쪽 및 바깥쪽 스윙러의 유량비, 스윙러 입출구단의 압력 차 변화 및 플레어 출구 길이 변화가 연소실내의 CTRZ 및 CRZ(Corner Recirculation Zone, 이하 CRZ)의 형성에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 실험하고 그 결과를 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

안쪽과 바깥쪽 스윙러의 유량비 변화에 대한 영향을 조사하기 위해 베인의 익형, 수량 및 각도는 동일하나, 전체 통과 유량 및 안쪽 스윙러와 바깥쪽 스윙러의 면적비가 다른 2종의 스윙러를 실험에 적용하였다. 적용된 스윙러의 제원과 형상은 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 플레어 끝단 길이비 변화에 대한 시험을 위해 앞서 Table 1로 제시된 2종의 스윙러에 Fig. 2에 제시된 플레어 끝단길이(Lf)를 플레어 목반경(Lt)로 무차원화한 Lf/Lt의 값을 0.3, 0.415, 0.485로 변경시킨 모델을 이용하여 시험을 수행하였다.

Table 1에 제시된 2종의 스윙러와 Table 2에 제시된 3종의 플레어에 형상에 대한 모델 챔버내의 유동형상을 조사하기 위하여 Fig. 3과 같은 PIV 시스템 및 챔버를 구성하였다. 챔버 후방에는 대기로부터 챔버로 유입되는 공기의 역류를 방지하기 위해 모델챔버 출구의 면적과 동일한

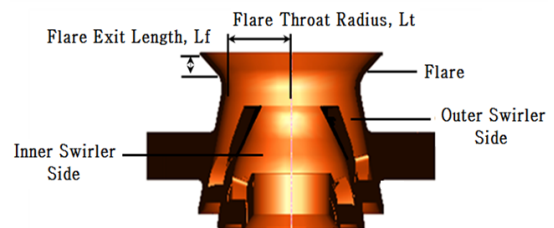


Fig. 1 Schematic of the swirler and definition of the flare exit length(Lf).

Table 1. Specification of test swirlers.

Swirler	#1 type	#2 type
Mass Flowrate*	1	1.08
Vane Angle (Inner/Outer)	40 / 45	40 / 45
Vane Type	Straight vane	Straight vane
Vane Number	12	12
Outer/Inner Area Ratio	2.3	1.5

\* Non-dimensionalized by the mass flowrate of Type #1

Table 2. Flare Type.

Flare Type	#1	#2	#3
Lf/Lt	0.3	0.415	0.485

단면적을 가지는 추가 덕트를 모델챔버 길이의 150% 길이로 연장하여 설치하였다. 챔버로 공급되는 공기의 온도는 전기식 공기히터를 이용하여  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  조건을 유지하였다. 스윌러 유동 전 후방의 압력 차는 다음과 같이 정의하였으며 후방 배기구를 상압으로 유지하여 시험 수행하였다. 대부분의 항공용 가스터빈 연소기 스윌러의 입출구 압력 차가 4%~5%인 점을 감안하여 스윌러 입출구 압력 차를 2%, 4%, 6%로 설정하여 시험을 수행하였다.

$$\Delta P(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

$P_1$  : 챔버 입구압력

$P_2$  : 대기압

PIV 시험을 위해 레이저는 10 Hz로 발진되는 Nd-Yag 200 mJ급 레이저 평면광원을 사용하였으며 CCD Camera가 동기되었으며 스윌러부터 유출되는 공기의 속도측정을 위해 Dantec사에서 제작된 Liquid Seeder Generator로부터 입자를 seeding하였다. 레이저 평면광의 입사를 위해 석영유리가 모델 연소기에 부착하였으며, 각 시험 조건당 PIV 이미지 300장을 획득하여 속도평균값을 산출하였다.

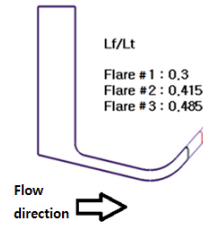


Fig. 2 Conditions of the flare exit length.

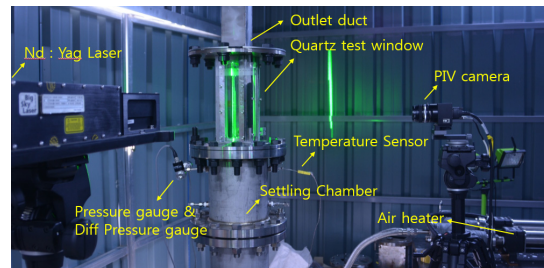


Fig. 3 Schematic of the experimental setup.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압력 차 조건에 따른 유동장 형상

Fig. 4와 Fig. 5는 스윌러 1형과 2형에 Flare #3을 적용한 스윌러 입출구단의 압력 차에 따른 CTRZ의 형상변화와 축방향 속도변화를 각각 나타낸다. 스윌러 1형과 2형에서 모두 동일한 압력 차 조건에 따른 CTRZ의 형상변화는 크지 않았으나 Fig. 5와 같이 압력 차가 증가할수록 CTRZ 내의 속도변화율은 증가하였다. Fig. 4 및 Fig. 5에서 안쪽 및 바깥쪽 스윌러의 유량비가 다른 1형과 2형 스윌러의 CTRZ 형상을 비교를 하면 1형 스윌러에서 상대적으로 긴 재순환 영역이 형성되었는데, 이는 1형 스윌러의 바깥쪽 스윌러 유량이 많아 2형 스윌러에 비해 상대적으로 운동량이 큰 스윌유동이 벽면을 타고 하류까지 지속되었기 때문에 유추되어, CTRZ의 전체 형태에 영향을 주는 것은 바깥쪽 스윌러의 유동으로 판단된다.

스윌러 벤츄리 출구단에서의 축방향 재순환속도 크기는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 스윌러 2형이 1형에 비해 강하게 형성되었다. 이는 스윌

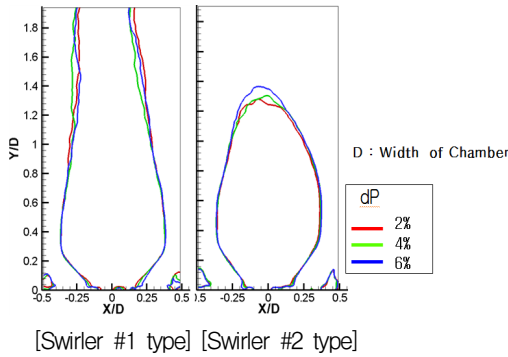


Fig. 4 Comparison of CTRZ size relating to differential pressure with the Flare #3.

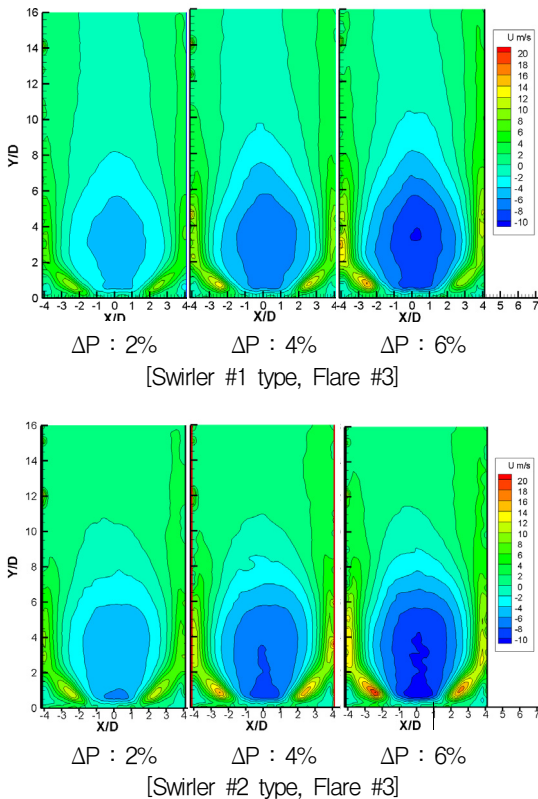


Fig. 5 Comparison of axial velocity relating to differential pressure with the Flare #3.

러 2형의 안쪽 스윌러가 1형에 비해 중앙부 스윌러속도가 상대적으로 높아 벤투리 중앙부 축방향 재순환 속도가 증가한 것으로 판단되며, 안쪽 스윌러유동은 벤투리 출구단에서의 재순환영역

분포에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

따라서 바깥쪽 스윌러유동은 CTRZ의 형상과 크기에 영향을 주며, 안쪽 스윌러에 의해 형성되는 스윌러유동은 벤투리부 바깥쪽의 재순환 영역의 분포에 영향을 주는 것으로 유추할 수 있다.

상기 결과로부터 실제 연소 환경에 적용시 기연소된 연소가스가 벤투리부로 유입되는 양은 안쪽 스윌러 유동에 영향을 받으며, 유입되는 재순환속도가 증가할수록 벤투리부에서의 온도 상승을 일으켜 연료 인젝터 출구면에서 분사되는 연료의 기화를 촉진시킬 것으로 예상된다. 그러나 기연소된 가스의 재순환속도가 증가할 경우 벤투리부에서는 높은 온도가 형성될 것으로 판단된다. 따라서 스윌러 플레어의 냉각요구 유량이 증가되므로 적정 재순환속도를 갖도록 안쪽과 바깥쪽의 스윌러 유량배분을 적정히 설계하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에 보이는 바와 같이 스윌러의 압력 차에 따라 CTRZ의 형태가 크게 변화하지 않음으로, 엔진 저출력 조건에서 고출력조건까지의 연소실 압력 차에 대해 연소가스의 스윌러에 의한 거시적인 재순환 유동은 크게 변화되지 않을 것으로 예상되나, 연소과정 동반시에는 열유동장이 크게 변화하므로[1] 이에 대한 추가 확인이 필요하다.

### 3.2 플레어 끝단 길이비 변화에 따른 CTRZ 및 CRZ 형상 변화

플레어 끝단 길이비에 따른 실험결과를 Fig. 6과 Fig 7.에 보이고 있다. Lf/Lt로 정의된 플레어 끝단 길이비가 가장 작은 Flare #1이 바깥쪽 스윌러의 유량이 많은 스윌러 1형에 적용된 경우 CTRZ의 전체 형상변화가 컸으며 Fig 7.에서 보이는 바와 같이 CRZ의 영역이 약화되어 챔버 코너부에서 재순환영역을 형성시키지 못하는 것으로 관찰되었다.

바깥쪽 스윌러 유량이 작은 스윌러 2형에 Flare #1을 적용한 경우, 스윌러 1형에 비해 상대적으로 CTRZ의 형상 변화는 크지 않으나, 길이가 증가하고 폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 플레어 끝단 길이비가 CTRZ의 형성을

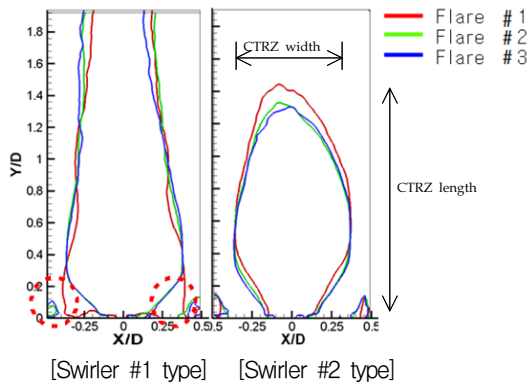


Fig. 6 Comparison of CTRZ size relating to flare types.

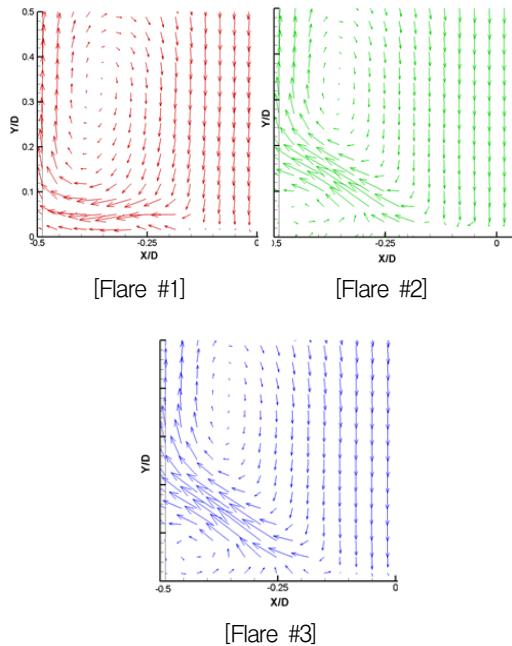


Fig. 7 Comparison of CRZ structure relating to flare types.

지배하는 인자이며, 바깥쪽 스윌러 유량이 많을수록 영향이 증가하는 것으로 보인다.

또한 스윌러 1형과 2형 모두 Flare #2와 Flare #3 적용결과에서 CTRZ 형상에 큰 변화를 보이지 않았다. 즉 플레어 끝단길이가 특정 길이 이상으로 확보되는 경우에 CTRZ 및 CRZ에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다. 또한 플레어

끝단은 연소환경에서 고온의 연소가스 및 화염에 노출될 수 있으므로 최적의 길이로 선정할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

Axial counter-rotating 스윌러의 안쪽/바깥쪽 스윌러 유량비 변화 및 플레어 끝단 길이비 영향을 조사하기 위한 PIV 유동시험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) CTRZ의 전체 형태에 영향을 주는 것은 바깥쪽 스윌러의 유동이다.
- 2) 스윌러 내/외에 동일한 유량비를 가지는 스윌러의 경우 스윌러 양단의 압력 차가 증가할수록 CTRZ의 형태는 크게 변화하지 않으나, 압력 차가 증가할수록 CTRZ내의 속도변화율은 증가하였다.
- 3) 안쪽 스윌러의 유동은 스윌러 벤츄리 출구단에서의 재순환속도 크기에 영향을 주며, 연소기 설계시 연료분분 미립화 및 스윌러 플레어 냉각을 고려하여 안쪽 스윌러 유량이 고려되어야 한다.
- 4) 플레어 끝단 길이비(Lf/Lt)가 작으면서 바깥쪽 스윌러의 유량이 많은 경우, CTRZ의 중심이 내려오고 CRZ가 감소하는 경향을 보인다.
- 5) 플레어 끝단 길이비(Lf/Lt)를 일정부분 이상 확보한 경우 동일 스윌러에 의한 유동에서 추가적인 플레어 끝단길이의 연장은 CTRZ 및 CRZ의 형상에 큰 영향을 주지 않으므로 실 연소기 운용시 플레어에 작용하는 열 접촉면적을 감안하여 플레어 끝단길이는 최적의 길이로 선정하는 것이 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청 선도형 핵심기술 개발 과제 “장수명 고부하 연소기 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. Lefebvre, A.H., Ballal, D.R., *Gas Turbine Combustion*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, F.L., U.S.A., 2010.
2. Wang, H.Y. and Samuelson, M.S., "Influence of Hardware Design on the Flow Field Structures and the Patterns of Droplet Dispersion: Part I," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 117, No. 2, pp. 282-289, 1995.
3. Estefanos, W., Tambe, S. and Jeng, S.M., "Effect of the Flare Expansion Angle on the Mean and Dynamic Behavior of Swirling Flow Generated by a Counter Rotating Radial-radial Swirler Using a Water Test Rig," ASME GT2015-43470, 2015.
4. Burrus, D.L., Chahrour, C.A., Foltz, H.L., Sabla P.W., Seto, S.P. and Taylor, J.R., "Combustion System Component Technology Performance Report," NASA CR-168274, 1984.
5. Mohanmmad, B.S., Cai, J. and Jeng, S.M., "Gas Turbine Single Annular Combustor Sector: Aerodynamics," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, F.L., U.S.A., AIAA 2010-0579, Jan. 2010.