

## 스윙 안정화/코안다 안정화 화염을 적용한 가스터빈 연소기 연소성능 특성에 대한 시험연구

김형모<sup>a,\*</sup> · 김재호<sup>a</sup> · 이상윤<sup>a</sup> · 이동호<sup>a</sup> · 김주평<sup>b</sup> ·  
김신현<sup>b</sup> · 안철주<sup>b</sup> · 박희호<sup>b</sup> · 이복원<sup>c</sup>

### Gas Turbine Combustor Performance Characteristics with Swirl Stabilized Flame and Coanda Stabilized Flame

Hyungmo Kim<sup>a,\*</sup> · Jaiho Kim<sup>a</sup> · Sangyoon Lee<sup>a</sup> · Dong-ho Rhee<sup>a</sup> · Jupyong Kim<sup>b</sup> ·  
Shaun Kim<sup>b</sup> · Chulju Ahn<sup>b</sup> · Heeho Park<sup>b</sup> · Bokwon Lee<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute, Korea

<sup>b</sup>Aerospace R&D Center, Hanwha Aerospace, Korea

<sup>c</sup>Defense Rapid Acquisition Technology Research Institute, Korea

\*Corresponding author. E-mail: [hmkim@kari.re.kr](mailto:hmkim@kari.re.kr)

#### ABSTRACT

This study represents the results of the combustor performance test evaluation on the single-sector combustor and annular combustor of the combustor with the pre-filming air-blast fuel nozzle. Notably, it was found that the two different combustion patterns, Swirl-stabilized and Coanda-stabilized flames, were switched according to the fuel nozzle dome swirler-tip angle and its axial location, respectively, which is called 'Recess' in this paper. In the absence of Recess with specific angles, the flame was attached near the dome wall by the Coanda effect and effect on the combustor performance.

#### 초 록

본 연구는 예비 액막 공기충돌형 연료노즐(이하, PAFN: Prefilming Airblast Fuel nozzle)을 갖는 연소기의 단일 섹터 연소기와 환형 연소기에 대하여 연소성능시험평가를 수행한 결과를 다루고 있다. 특히 PAFN의 돔 스윌러 끝단 각도와 위치에 따라 스윙 안정화 화염과 코안다 안정화 화염의 두 가지 다른 패턴의 연소형상이 전환됨을 확인하였다. 두 화염을 단일 화염 가시화를 위한 섹터 연소 시험을 수행하여 화염구조의 특성을 이해하였으며 실제 사용될 환형 연소기 성능시험을 확보함으로써 코안다 화염의 가스터빈 연소기 적용 가능성을 알 수 있었다.

Key Words: Prefilming Airblast Fuel Nozzle(예비 액막 공기충돌형 연료노즐), Dome Swirler(돔 스윌러), Combustor Performance Test(연소기 성능시험), Coanda Effect(코안다 효과)

## Nomenclature

$a$	: Recess distance from dome wall(mm)
$d$	: Dome swirler outer wall diameter(mm)
$Rr$	: Recess ratio(=a/d)
PAFN	: Pre-filmming fuel nozzle
$T_3$	: Combustor inlet temperature
$T_4$	: Combustor exit temperature
$T_{4,peak}$	: Combustor exit peak temperature
Pattern Factor	: $(T_{4,peak} - T_4)/(T_4 - T_3)$
$\eta_c$	: Combustion efficiency
$\phi$	: Equivalence ratio

## 1. 서 론

일반적으로 스윙유동은 항공, 산업용 버너, 사이클론 분리기, 등과 같이 다양한 응용분야에 활용되어 화염 안정성을 높이고 오염물을 저감하는데 유용하게 사용되고 있다[1].

가스터빈 연소기는 연료와 공기의 연소반응을 통해 화학적 에너지를 이용하여 터빈을 회전시키기 위한 고온/고속의 가스를 생성하는 역할을 수행한다. 이때 효율적인 연소반응을 위해서는 적절한 연료입자의 미립화와 연료/공기의 균일한 혼합이 필수적이다. Airblast 노즐은 적은 연료압력으로 공기충돌면과 전단력에 의한 무화과정을 거치면서 효과적인 미립화 결과를 가지는 장점을 가진다[2]. Winterfeld[3] 등은 inner내부 스윌러와 outer외부 스윌러 사이에 연료 Prefilmer를 설치하여 역방향 회전하는 두 스윌러의 전단면에서 액막이 더욱 활발한 무화과정을 갖도록 연구한 바 있다.

1910년, 앙리 코안다에 의해 연소가스 유동이 동체 벽면을 따라 유동이 형성되는 것이 발견된 이후, 1934년 테오도르 본 카르만에 의해 '코안다 효과'라는 물리적 현상으로 정의되었다. 코안다 효과는 자유 제트 유동에서 곡면을 따라 흐르는 그 경계층 흐름에 의해 지배되며 현재까지도 다양한 분야에서 활용되고 있다[4].

Gil 등[5]은 축대칭 및 방사상 내측 제트가 생성되도록 축대칭 곡선 벽 제트 구성을 연구하였다. 그들이 제안한 버너는 버너 노즐 출구에 실린더 형태의 Flameholder를 가지며 노즐 출구와 실린더 사이로 연료/공기 혼합기가 상부와 하부로 분사되는 특징을 가지고 있다. 이 두 개의 제트는 각 곡면에서 저압이 형성되는 코안다 효과에 의해 곡면에 부착되고 두 제트가 만나는 점에서 화염안정화에 필요한 재순환 영역도 관찰되었다.

Lewis[6]등은 해당 버너에 대한 LDV 계측을 통해 코안다 화염이 재순환 영역내 잘 유지됨을 보여주었다. 재순환 영역에서는 유속이 충분히 작으며 화염속도는 튜브 블로우 오프(blow off) 속도보다 높은 속도로 유지됨을 확인하였으며 결론적으로, 기존 제트 버너에 비하여 소염 범위를 확장시키고 화염높이를 감소시키는 코안다 버너의 장점을 입증하였다.

Vanierschot[7] 등은 IFRF(International Flame Research Foundation)에서 설계한 스윙 유동을 갖는 노즐 출구에서 다양한 스윙수에 따른 유동 패턴을 LDV로 측정하였으며 1 이하의 낮은 스윙수에서는 스윙 유동을 만들며 스윙수의 감소는 코안다 유동을 형성함을 보였다.

Castaneda[8]등은 본 연구에서도 사용된 45도 스윌러 끝단 각도를 갖는 전형적인 스윌버너에 대하여 외부자극을 통하여 판형 형상의 코안다 화염을 유도하였다. 당량비와 유동 패턴에 따라 화염역화부터 블로우 오프 까지 코안다 화염과 스윌 화염의 영역을 조사하였으며 당량비 1.0~2.5에서 안정한 코안다 화염을 얻을 수 있었다.

Valera[9]등은 코안다 안정화 화염과 스윌 안정화 화염에 대하여 본 연구에서 다루고 있는 Step size,  $\Delta x$ (축방향 하류 위치 변화량)에 따라 상호 화염의 변이 히스테리시스를 확인하였다.

본 연구는 가스터빈 연소기에 장착되는 전형적인 예비 액막 충돌형 연료노즐을 대상으로 하고 있으며 라이너와 연료노즐이 만나게 되는 스윌러의 가장 바깥쪽에 위치한 돔 스윌러 외벽의 축방향 위치변화(Rr)와 그 끝단 각도에 따른 연소기의 성능 특성을 확보하고자 하였다.

2. 시험시제 및 리그

2.1 연소기 및 연료노즐

본 연구는 방산산업기술지원센터의 지원을 받아 '1,000마력급 가스터빈용 가스발생기 기술개발'의 일환으로 개발 중인 연소기 기술개발로 수행된 결과이다. 개발 연소기는 환형 역류형 라이너와 Air blast 방식의 연료노즐로 구성되며 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다.

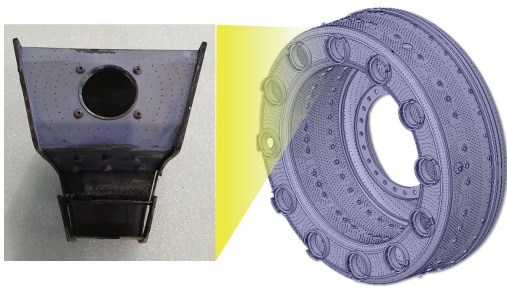


Fig. 1 The annular and sector combustor liner.

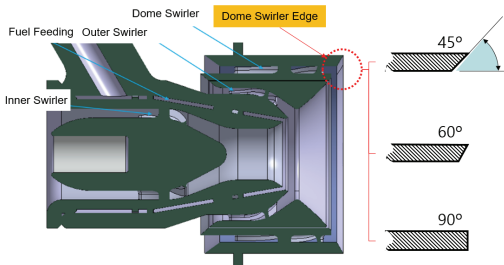


Fig. 2 Fuel Nozzle and dome swirler edge.

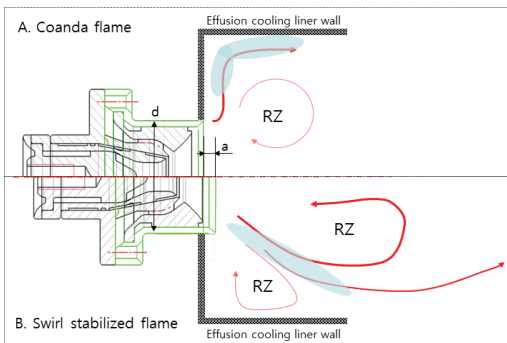


Fig. 3 The coanda/swirl stabilized flame structure showing 'a' and 'd' for Recess ratio, Fr.

개발 연소기는 12개의 PFSN 연료노즐과 Effusion 냉각 라이너를 가진다. 연료노즐의 구성은 내부 스윌러, 외부 스윌러, 돔 스윌러로 되어있으며 서로 반대방향으로 유동이 회전하는 내부와 외부 스윌러 사이에 연료 Prefilming 채널을 돔으로써 Air blasting에 의한 미립화를 구현하였다. 돔 스윌러는 외부 스윌러와 동방향으로 회전시켜 유동 재순환을 강화시키고 분무 각도를 제어하는 목적을 가지고 있다.

Valera[9] 등의 연구 결과로부터 코안다 효과를 발생시키기 위하여 Fig. 2와 같이 돔 스윌러의 외벽의 끝단에 서로 다른 각도의 챔퍼를 두었고 매우 작은 Recess 유무에 따라 코안다/스윌러 화염으로 전환 및 제어 될 수 있다는 점에서 착안하여 선행연구[10]에서는 돔 스윌러 끝단 각도 (45°, 60°, 90°)에 대하여 분무 시험을 수행하였다.

Fig. 3에 연료노즐 위치에 따라 일반적으로 스윌러로 안정화된 화염의 구조(내부 CRZ(Center Recirculation Zone)과 외부 ORZ(Outer Recirculation Zone)으로 구성)와 본 연구에서 확인한 코안다 효과에 의해 안정화된 화염의 구조(화염대가 노즐 부근 벽면에 부착되어 형성)를 개념화하여 나타내었다.

2.2 섹터 연소기 시험리그

Fig. 4에 섹터 연소기 시험리그의 개념도를 Fig. 5는 실제 화염 가시화 시험 장면이다. 섹터 연소시험의 가장 큰 목적은 화염 가시화를 통한 화염 구조와 유동해석의 초기 검증에 있다. 시험리그에 이중 가시화 창을 돔으로써 내압에 강하도록 제작되었다.

2.3 환형 연소기 시험리그

환형 연소기 성능시험은 실제 연소기의 성능(전압력손실, 연소효율, 후류 온도/압력 패턴, 점화성능 등) 검증을 위하여 제작되었으나 본 연구에서 논하고자하는 필수적인 내용만 소개하도록 한다. 연소효율은 배기가스 분석을 통하여 결정 [1]하고 후류온도 분포는 연소기 하류, 터빈 베인 설치 위치에서 레이크를 회전시켜 측정하는 기법을 사용한다.

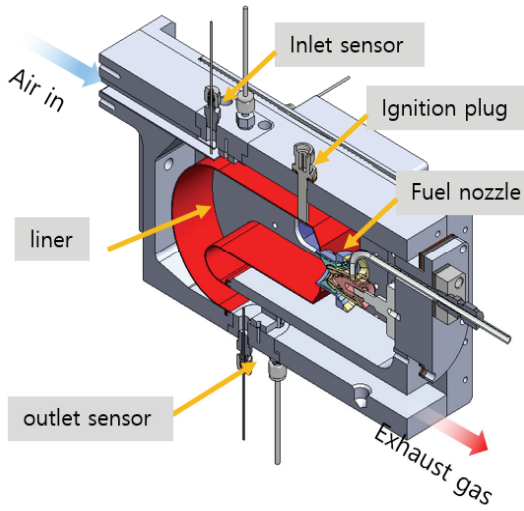


Fig. 4 Combustor sector test ring. (Inner chamber cross-section)

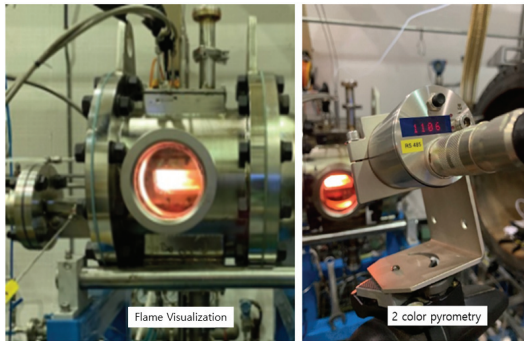


Fig. 5 Sector combustor test footage.

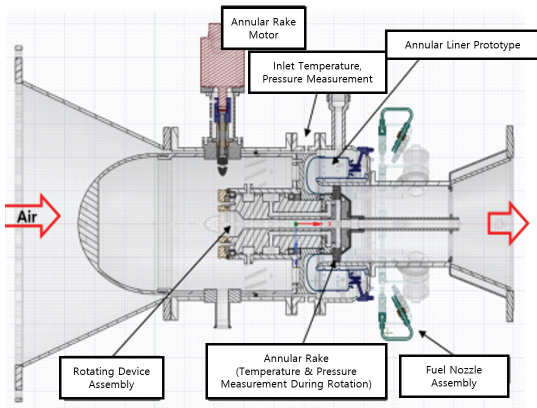


Fig. 6 Full annular combustor test rig.

3. 시험설비 및 시험방법

3.1 시험설비

항우연이 보유한 중저압 연소시험설비는 Table 1의 사양을 갖고 있으며 연속 운전이 가능 시험설비이다.

3.2 시험방법

섹터 연소기 시험과 환형 연소기 성능시험은 시험설비의 공기공급부와 가열부 및 Stilling Chamber를 통과하여 연소기로 공급된다. 시험에 필요한 조건은 연소기 전후단의 밸브를 통하여 미세 조정하여 구현하였다.

Table 1. Specification of the low/middle pressure test facility of KARI.

Specifications	Value
Air flow rate(kg/s)	6
Air temperature(°C)	450
Air Pressure(kPa,a)	1,100
Liquid fuel flow rate(kg/hr)	1,000

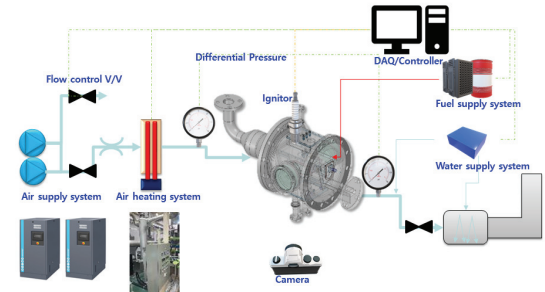


Fig. 7 Schematics of the combustor test facility.

Table 2. Experimental conditions.

Conditions	Sector	Annular
Air flow(kg/s)	0.05	0.6
Combustor inlet temperature(°C)	420	420
Pressure(kPa)	~300	~300
$\phi$ (-)	0.15,0.2,0.37	0.18
Dome swirler edge angle(°)	45, 60, 90	60
Recess ratio(Rr)	0, 0.03	0, 0.03

4. 시험결과

4.1 분무 성능시험

선행연구[11]에서 소개된 돔 스윌러 끝단 각도와 Recess ratio(Rr)에 따른 코안다 분무유동 발생 여부를 Fig. 8에 나타내었다. 해당 연구를 통하여 45°와 60°, 그리고 Rr이 0일 때 코안다 효과가 발생하고 있음을 확인한 바 있다.

4.2 섹터 연소기 성능시험

4.2.1 점화시험

점화시험은 공기 유량 변화에 따른 최소 연료량 측정을 통하여 성능이 확보되었으며 분무시험결과에 따라 코안다 효과가 없는 돔 스윌러 끝단 각도 90°와 코안다 효과가 두드러진 45°로 점화시험을 수행하여 Fig. 9에 나타내었다.

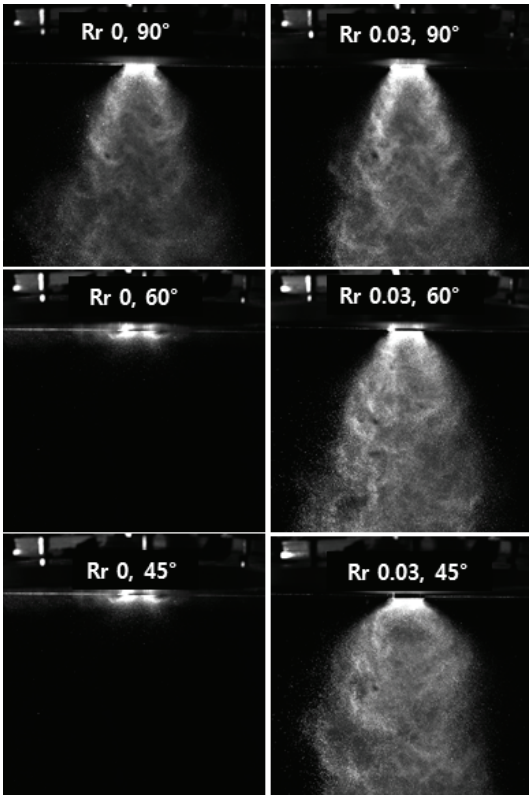


Fig. 8 Spray images with various dome swirler edge angle and Recess ratio[10].

돔 스윌러 끝단이 각도가 90°인 경우는 스윌 화염 형태를 가지면서 가장 작은 점화영역을 보였다. 같은 스윌 화염 형태이지만 돔 스윌러 끝단 각도가 45°, 노즐의 위치가 라이너 안쪽으로 이동된(Rr=0.03) 환경에서 점화 가능 영역이 가장 큰 결과를 얻었다. 위 두 가지 조건의 비교는 라이너 축방향에 설치된 점화기 위치의 변화 또는 화염각도에 따른 점화성능의 결과로 해석될 수 있다. 코안다 효과가 발생하는 45° Rr이 0인 조건은 공기유량이 작은 경우에는 점화성능이 가장 우수하였고 공기 유량변화에 영향이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료/공기 혼합기가 점화기가 설치된 벽면을 따라 흐르기 때문에 점화기 위치가 영향을 주는 스윌 안정화 화염과는 달리 연료/공기 당량비가 점화 영역에 지배적인 것으로 판단한다.

4.2.2 화염형상

점화시험 단계에서 돔 스윌러 끝단 각도 45°를 선정하였으며 돔 스윌러 끝단 각도 60°를 제작하여 화염 형상을 확인하였다. 돔 스윌러 끝단 각도가 45°인 경우 다양한 당량비와 Recess여부에 따라 Table 3과 같은 화염형상을 얻었으며 돔 스윌러 끝단 각도 60°인 경우 Recess 여부에 따라 Fig. 10과 Fig. 11에 화염형상을 나타내었다. 끝단 각도가 45°인 경우, Recess 0에서 0.03으로 약간의 변화를 주었음에도 화염의 각도가 벌어지는 것을 볼 수 있다.

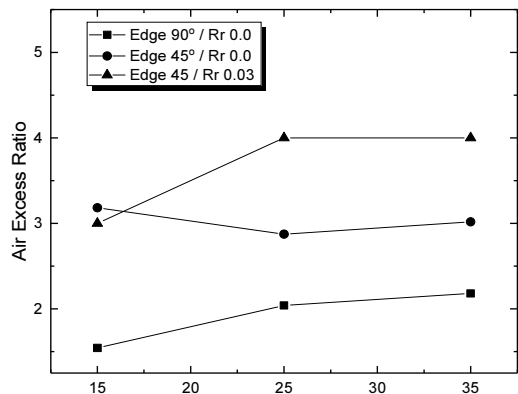


Fig. 9 Ignition test results of sector combustor.

Table 3. Flame visualization test results.

$\phi$ [-]	[dome swirler edge angle(°)] /[Rr= $\alpha$ /d]	
	[45/0.0]	[45/0.03]
0.37		
0.25		
0.15		

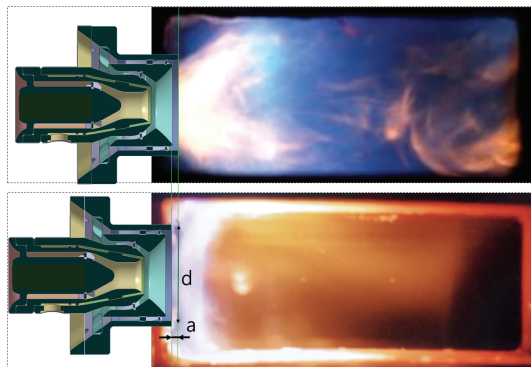


Fig. 10 Swirl and coanda flame images@ dome swirler edge=60°,  $\phi=0.37$  (upper Rr=0, Down Rr=0.03).

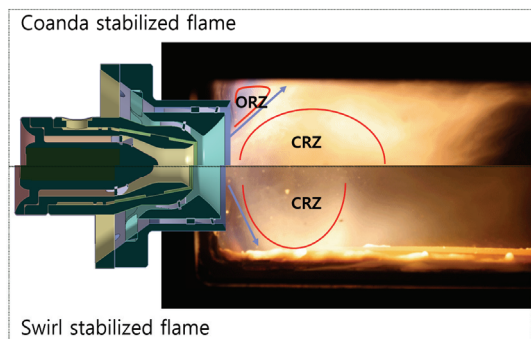


Fig. 11 Average images of Swirl and coanda stabilized flame@ dome swirler edge=60°,  $\phi=0.37$ .

Fig. 11의 이미지는 Fig. 10과 동일한 조건이지만 노출시간을 상대적으로 길게 하여 평균 이미지의 의미를 갖도록 하여 얻은 결과이다. Fig 10으로부터 Recess의 유무에 따라 화염의 천이가 명백함을 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 11의 상단에 Rr=0.03인 경우와 Rr=0인 경우를 상하로 나타내었다. Rr=0.03인 경우, CRZ(Center Recirculation Zone)와 ORZ(Outer Recirculation Zone)가 있고 그 가운데 전단면을 따라 화염대가 형성된 전형적인 스윙 안정화 화염임을 알 수 있다. 같은 조건에서 Recess가 없는 경우에는 화염이 라이너에 벽면에 부착되고 ORZ가 없고 CRZ가 작게 형성되는 코안다 안정화 화염을 볼 수 있다. 해당 특이점을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 코안다 화염은 라이너 벽면을 따라 반경방향으로 화염이 증가하다가 축방향을 따라 발달하는 형태를 보인다.
- Recess가 있는 경우는 화염의 축방향 길이가 증가하고 화염의 각도가 좁아지는 스윙 안정화 화염 형상에 가까운 형태를 가진다.
- 코안다 화염은 스윙 안정화 화염에 비하여 축방향 길이가 짧으며(화염각도가 큼) 라이너 벽면을 따라 발달한다.
- 당량비가 높을수록 라이너 벽면을 따라 고온부가 더욱 강하고 넓게 생성되며 화염의 크기도 커진다.
- 돔 스윙러 끝단 각도와 Recess양에 따라 화염천이(코안다 안정화 화염 ↔ 스윙 안정화 화염)가 나타난다.
- Recess변화에 대한 민감도와 관련하여, 돔스윙러 끝단 각도는 선단부가 가장 날카로운 45°에서보다 60°에서 화염천이가 더욱 쉽게 발생하는 것으로 보아 화염천이에 대한 돔스윙러 끝단 임계각도가 있을 것으로 유추할 수 있다.
- Recess가 없는 경우, 라이너 벽면색이 황백색을 가짐으로써 상대적으로 라이너 온도가 높을 것임을 알 수 있다.

#### 4.2.3 배기가스 분석 및 연소효율

섹터 연소시험에서 세 가지 노즐 형태에 대한

여 배기가스 분석기(HORIVA社-VA3000, FID510)를 통해 미연가스를 측정하고 연소효율에 대한 성능을 확인하였다. 연소가스를 통해 연소효율을 계산하는 방법은 참고문헌[1]을 참고하여 계산하였다. 돔 스윌러 끝단 각도가 45° 인 경우, Recess가 없는 코안다 안정화 화염에서 HC와 CO를 많이 발생시키면서 스윌 안정화 화염보다 연소효율이 낮게 나왔다. 돔 스윌러 끝단 각도의 비교에서는 45도의 Recess 있는 경우보다도 60° Recess없는 경우가 HC와 CO가 가장 낮게 나왔다. Fig. 12와 13에 따라 연소효율이 높은 순은 돔스윌러 끝단 각도 및 Recess유무에 따라 45°/NO Recess(코안다 화염) < 45° Recess(스윌

화염) < 60° NO Recess(코안다 화염)의 순임을 알 수 있다.

결국, 연소효율이 가장 높은 60° 돔스윌러 끝단 각도 노즐을 환형 연소기 시험 대상으로 선정하였으며 해당 노즐의 Recess 유무에 따른 성능시험을 수행하기로 하였다.

4.3 환형 연소기 성능시험

4.3.1 배기가스 분석 및 연소효율

Fig. 14는 돔 스윌러 끝단 각도 60°에 대한 환형 연소기 성능시험의 배기가스 측정 결과이다. 연소효율과 상관관계가 있는 CO와 HC 경우 섹터 연소시험과 같이 낮은 당량비에서 코안다 화

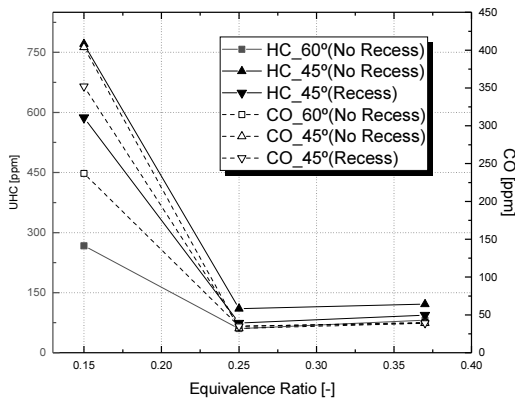


Fig. 12 Emissions vs  $\phi$  of the different dome swirler edge angle and Recess.

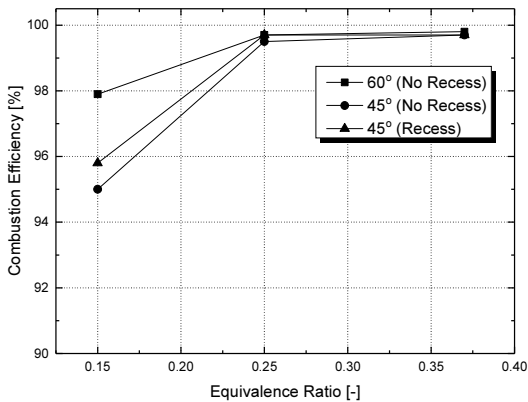


Fig. 13 Combustion efficiency of the different dome swirler edge angle and Recess.

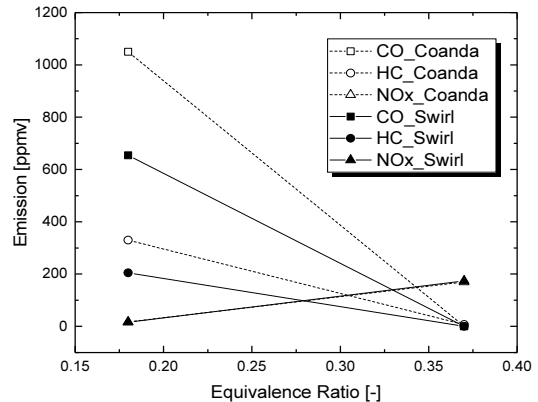


Fig. 14 Emissions vs  $\phi$  of the coanda/swirl stabilized full annular combustor.

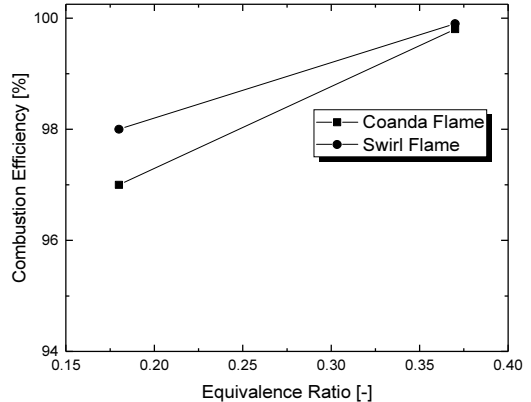


Fig. 15 Combustion efficiency vs  $\phi$  of the coanda/swirl stabilized full annular combustor.

염이 60~70% 높게 나왔다.

따라서 연소효율 측면에서는 스윙 안정화 화염의 성능이 우수함을 알 수 있다. 연구에 사용된 라이너는 Effusion 냉각을 사용하기 때문에 벽면을 따라 주요 화염이 형성되는 코안다 안정화 화염의 특성상 라이너 벽면의 수많은 냉각공기공과 화염의 충돌로 인해 CO와 UHC가 발생할 가능성이 있을 것으로 유추하고 있다. 특히, 시험 후 사용된 라이너에 대한 분해 점검 당시, 코안다 화염이 생성되는 위치에서 soot가 확인되기도 하였다.

### 4.3.2 라이너 표면 온도

연소기의 라이너에는 k-type 표면 온도 센서가 14개 부착되어 있으며 Fig. 16에 그 중 축방향 길이에 따른 표면 온도 값을 나타내었다.

앞서 화염 형상 결과에서 예상할 수 있듯이 코안다 화염의 경우 짧은 화염대로 인해 노즐 출구부와 축방향 근거리에서 온도가 상대적으로 높고 스윙화염은 화염면이 라이너와 충돌하는 하류에서 보다 온도가 높음을 볼 수 있다.

### 4.3.3 후류 온도 분포

연소기 후류, 즉 터빈 베인 입구에 해당하는 위치에 4개의 레이크가 배치되어 있으며 0.2~0.3 rpm으로 레이크를 회전시켜 온도분포를 획득하였다.

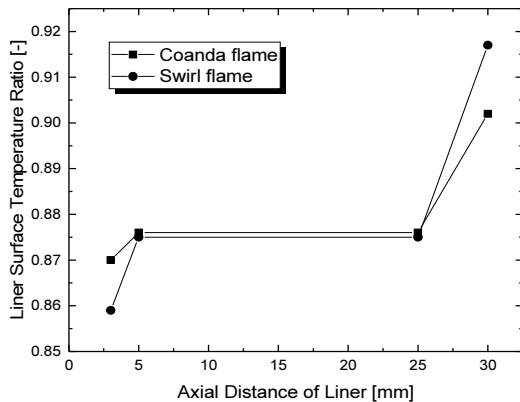


Fig. 16 Liner surface temperature comparison between flames for the different axial location.

Fig. 17과 Fig. 18은 각 화염형태에 따른 연소기 후류온도 패턴을 컨투어(Contour)로 나타낸 결과이며, Fig. 19, Fig. 20은 각 화염형태에 따른 후류의 Annular 방향 온도분포이다. 이때 Exhaust Temperature ratio는 보안상 실제 온도를 나타낼 수 없어 온도를 기준 온도로 나누어 무차원화 하였다.

Fig. 17~Fig. 20에서 볼 수 있듯이 코안다 화염이 연소기 후류 온도패턴에서 보다 온도 피크(Peak)가 적고 균일한 분포를 보임을 알 수 있다. 이를 정량화하기 위하여 Pattern Factor의 값으로 나타내어 보면 코안다 화염이 18%, 스윙 화염이 25%로 코안다 화염이 온도분포의 균일성

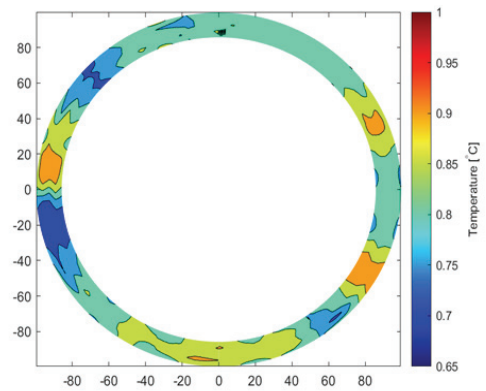


Fig. 17 Combustor exit temperature distribution of coanda stabilized combustor.

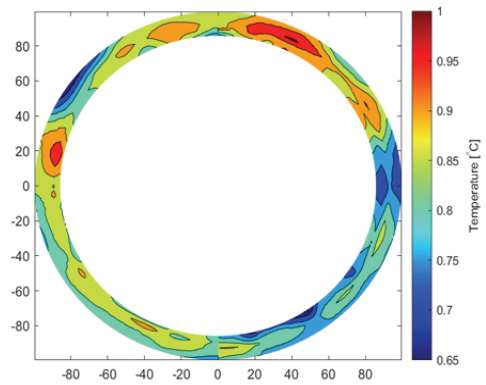


Fig. 18 Combustor exit temperature distribution of swirl stabilized combustor.



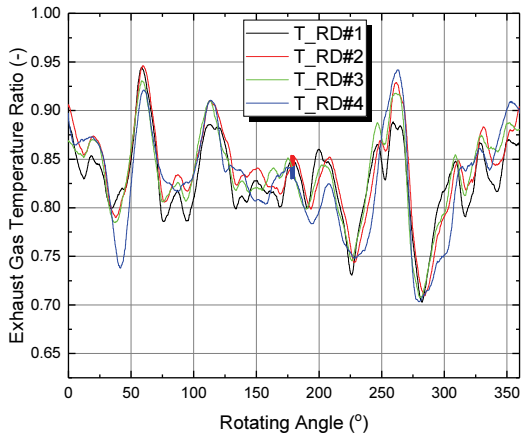


Fig. 19 Annulus combustor exit temperature distribution of coanda stabilized combustor.

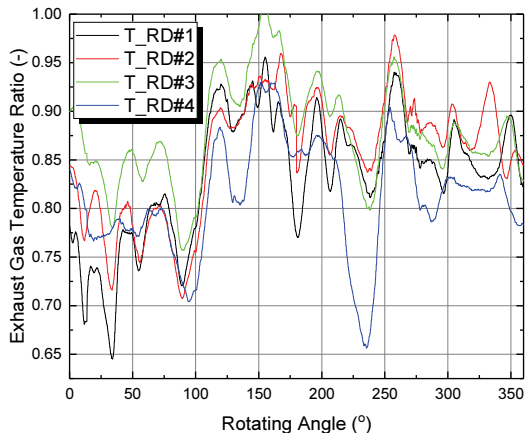


Fig. 20 Annulus combustor exit temperature distribution of swirl stabilized combustor.

면에서 우위에 있음을 알 수 있다. 화염가시화와 라이너 온도측정 결과를 토대로 코안다 화염은 축방향 반응대가 짧기 때문에 상대적으로 온도 혼합을 위한 체류시간이 길어서 보다 균일한 온도분포를 갖는 것으로 예상할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 코안다 안정화 화염의 특징과 함께 실제 연소기에 적용시 다음과 같은 성

능 특성을 가짐을 알 수 있었다.

- 1) 코안다 화염은 분부환경에서 발생한 형상 및 시험조건에서 동일하게 발생한다.
- 2) 축방향으로 작은 양의 Recess(하류방향 이송)를 두더라도 일반적인 스윙화염으로 변경될 수 있다.
- 3) 코안다 화염은 부하(당량비)가 높을수록 노즐 부근 라이너에 열적 부하를 높게 부과하여 라이너의 손상을 입힐 수 있다.
- 4) 그러한 특성으로 인해 화염과 냉각 공기와의 충돌이 있을 수 있으며 미연가스가 발생할 수 있어 냉각방식의 선정시 고려해야한다.
- 5) 짧은 화염의 특성으로 터빈 베인의 위치에서 일반적인 스윙 안정화 화염에 비해 Pattern Factor가 양호해진다.

결론적으로, 코안다 화염을 가스터빈 연소기로 적용 함에 있어서 기존 라이너 냉각과 형상설계 보완을 통하여 보다 체적이 작은 연소기에 적용 가능함을 알 수 있었다.

- 1) 라이너 냉각은 화염과의 직접 충돌이 없는 이중 impinging cooling 라이너 등을 적용하면 저 부하에서의 연소효율을 개선할 가능성이 있다.
- 2) 라이너 돔 높이를 크게 설계함으로써 열적 부하를 감소할 수 있다. 또한, 희박 고공 재점화 연소기 등 다양한 목적으로 활용 가능할 것으로 판단한다.
- 3) 파일럿 노즐로 가변 Recess 적용함으로써 코안다 화염의 고강도 플랫 화염과 저공해 노즐로의 전환으로 활용 가능할 수 있다.
- 4) 저공해 특성은 기본적으로는 스윙화염과 유사하여 파일럿 뿐만 아니라 메인등의 다단 연소로 활용 가능할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 방위산업기술지원센터 지원 하에 '복합형 회전익용 터보샤프트 엔진 핵심구성품 개발'과제(UC190008D)의 일환으로 수행되었습니다.

## References

1. Lefebvre, A.H., *Gas Turbine Combustion*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, N.Y., U.S.A., 1983.
2. Haung, Y. and Yang, V., "Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 35, pp. 293-364, 2009.
3. Winterfeld, G., *Design of Gas Turbine Combustors*, Academic Press Cambridge, M.A., U.S.A., 1984.
4. Ahmed, N.A., *Coanda Effect: Flow Phenomenon and Application*, 1<sup>st</sup> ed., CRC Press, Boca Raton, F.L., U.S.A., 2021.
5. Gil, Y.S., Jung, H.S. and Chung, S.H., "Premixed Flame Stabilization in an Axisymmetric Curved-Wall Jet," *Combustion and Flame*, Vol. 11, pp. 348-357, 1998.
6. Lewis, B. and Elbe, G. von, *Combustion, flames, and explosion of gases*, 3<sup>rd</sup> ed., Academic Press, Orlando, F.L., U.S.A., 1987.
7. Vanierschot, M. and Van den Bulck, E., "Hysteresis in flow patterns in annular swirling jets," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 31, pp. 513-524, 2009.
8. Castaneda V. and Valera-Medina, A., "Coanda flames for development of flat burners," *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 1885-1890, 2019.
9. Dafsari, R.A., Kasabi, M.K., Kim, J. and Lee, J., "Effect of flare geometry and swirl ratio on the Coanda effect in unconfined spray of Pre-filming air-blast nozzle with triple swirler," *31st Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, North and South America, Madison, W.I., U.S.A., May 2021.
10. Kim, J., Kim, S., Dafsari, R., Lee, J., Kim, H., Kim, J., Ahn, C., Park, H. and Lee, B., "Spray and Combustion Characteristics of Prefilming Airblast Nozzle," *62<sup>nd</sup> KOSCO Symposium*, Jeju, Korea, Nov. 2021.