

가스터빈용 환형연소기의 연소실 길이비에 따른 화염특성

김재영* · 이동원** · 이기만*†

The Flame Characteristics of Annular Combustor for Gas Turbine according to Combustor Length Ratio

Jaeyeong Kim*, Dongwon Lee**, Keeman Lee*†

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the real flame shape and characteristic of annular combustor. To identify the effects of combustor length ratio and equivalence ratio on the flame shape in annular combustion configuration, the employed parameters are combustor length ratio 0.6-1.0, equivalence ratio 0.7-1.1. The flame shape is visualized using DSLR camera and precision optic mirror. The flame intensity is analyzed by OH* chemiluminescence images with ICCD camera. CO and NOx emission performance is also examined using an exhaust gas analyzer. From the visualized images, it is confirmed that the different tendency appeared in combustor length ratio 0.6-0.7 and 0.8-1.0. The results of OH* chemiluminescence show that the flame intensity is the most uniform for equivalence ratio 0.9. The smaller equivalence ratio is, the less emission of CO and NOx will be in this investigation range.

Key Words : Annular combustor, Combustor length ratio, Premixed, Reddish flame

환형연소기는 연소실의 공간을 최대한으로 이용할 수 있고 엔진 지름을 최소화 할 수 있으며 연소실내 압력손실이 다른 연소기에 비해 낮은 장점이 있어 가스터빈 연소기에서 널리 이용되고 있다. 연소조건에 따라 화염의 거동이나 연소 반응이 상이할 것으로 판단됨으로 연소조건 최적화에 관한 연구는 필수적이다.[1-4]

환형연소기에 관한 계산적 연구들은 이전부터 수행되었지만 연소조건에 따른 각각의 실제 화염형상과 특성에 관한 실험적 연구는 상대적으로 부족한 상태이다. 이에 따라, 연소조건에 따른 환형연소기의 실제 화염형상과 특성을 관찰하여 최적화에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 분산발전형 마이크로 가스터빈용 연소기는 8개의 축 방향 선회기로 구성된 환형연소기이다. 연소기의 개략도와 사용된 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 연소실에 유입되는 연료와 산화제가 보다 더 균일하게 혼합되도록 적절한 유로계 설계로 연소실 덤프면에서 분사되기 전에 예혼합 되도록 하였다. 연소실을 묘사하기 위하여 연소기 출구부분에 원통형 석영유리관(quartz tube)을 위치시켰으며,

화염형상을 가시화하고 열 방출의 지표로 OH* 이미지를 취득하기 위해 가로 세로가 100×100mm, 두께 15mm, 표면평탄도 $\lambda/4$, UV Enhanced Aluminum($R_{avg} > 85\%$, 250-700nm)로 코팅된 정사각형의 정밀한 광학미러(opic mirror)를 45° 기울여 사용하였다. CO 및 NOx 배출성능을 검토하기 위하여 배기가스 분석기(330-2LL, Testo Inc.)가 사용되었다. 석영유리관은 직경 100mm, 두께

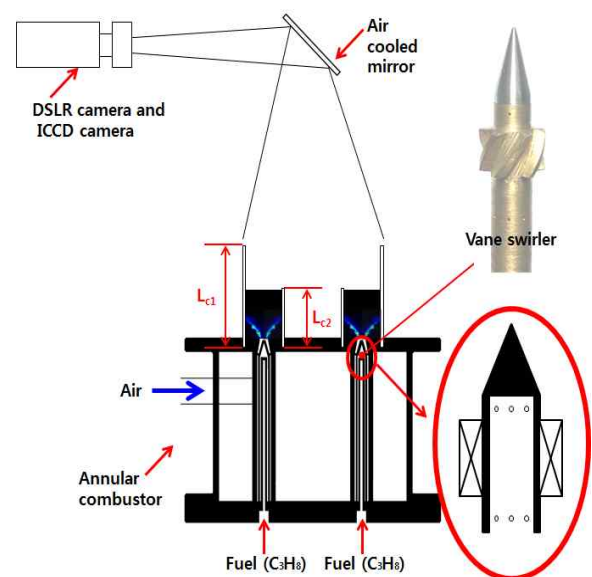


Fig. 1 Experimental setup diagram.

* 순천대학교 기계우주항공학부 우주항공공학전공

** STX중공업(주) 기술연구소

† 연락처, kmlee@snu.ac.kr

TEL : (061)750-3828 FAX : (061)-750-3820

3mm, 길이 100, 150mm의
Table 1 Experimental conditions

Equivalence ratio	0.7-1.1
Swirl number	0.83
Thermal power(kW)	5
L_{cl} (mm)	100, 150
L_{c2} (mm)	60-150
L_{c2}/L_{cl}	0.6-1.0
Outer quartz tube (mm)	diameter : 100
	thickness : 3
Inner quartz tube (mm)	diameter : 43
	thickness : 2.5

외부석영 유리관과 직경43mm, 두께 2.5mm, 길이 60-150mm의 내부 석영 유리관이 사용되었다.

Figure 1에 외부 석영유리관의 길이를 L_{cl} , 내부 석영유리관의 길이를 L_{c2} 로 정의하여 나타내었고, 외부와 내부의 길이비를 L_{c2}/L_{cl} 로 정의하였다.

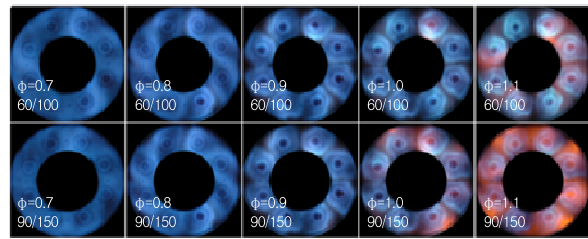
이전 연구를 통해 열용량 5kW, 당량비 0.9-1.0인 조건에서 환형연소기의 화염이 가장 안정화되는 것으로 확인되었다.[5] 본 연구에서는 열용량을 5kW로 고정시켰을 때 화염형상에 영향을 미치는 주요변수로 연소실의 길이비 (L_{c2}/L_{cl})와 당량비를 설정하였으며 실험조건을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 연소기 연료는 프로판(C_3H_8)이 사용되었으며, MFC를 통해 연료와 공기가 각각 공급되었다.

Figure 2는 열용량 5kW에서 L_{c2}/L_{cl} 를 0.6-1.0, 당량비를 0.7-1.1로 각각 변화시켰을 때의 화염형상이다. L_{c2}/L_{cl} 이 0.6부터 1.0까지 $L_{cl}=100$ mm일 때 L_{c2} 는 60, 70, 80, 90, 100mm가 사용되었으며, 마찬가지로 $L_{cl}=150$ mm일 때 L_{c2} 는 90, 105, 120, 135, 150mm가 사용되었다.

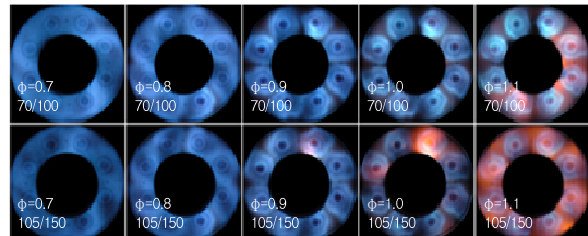
각각의 조건에서 관찰된 4가지 특징적인 화염을 Fig. 3에 나타내었다. Lift-off flame(LF), Partial Lift-off flame(PL), Stable flame(ST), Reddish Rich flame(RR)로 구분된다. LF는 연료가 희박한 조건에서 모든 화염이 부상되는 경우를 의미하며, PL은 부분적으로 부상된 화염과 부착된 화염이 공존하는 것을 의미한다. ST는 모든 화염이 부착되어 안정되는 것을 의미하며, 마지막으로 RR은 적염을 의미한다.



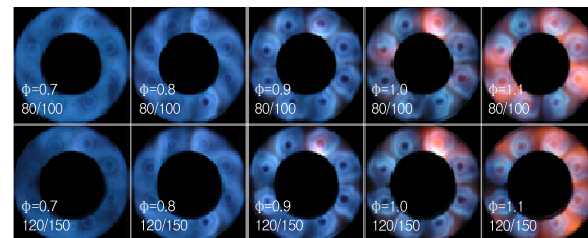
Fig. 3 Front view of the flame shapes according to the flame mode.



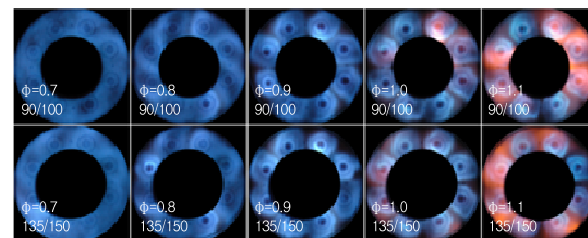
(a) $L_{c2}/L_{cl} = 0.6$



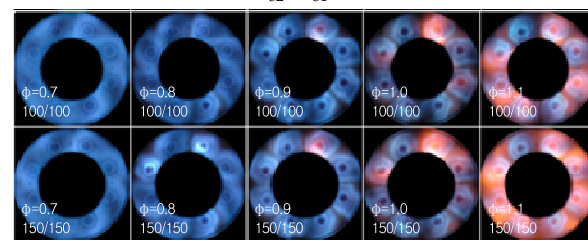
(b) $L_{c2}/L_{cl} = 0.7$



(c) $L_{c2}/L_{cl} = 0.8$



(d) $L_{c2}/L_{cl} = 0.9$



(e) $L_{c2}/L_{cl} = 1.0$

Fig. 2 Top view of the flame shapes in each condition.

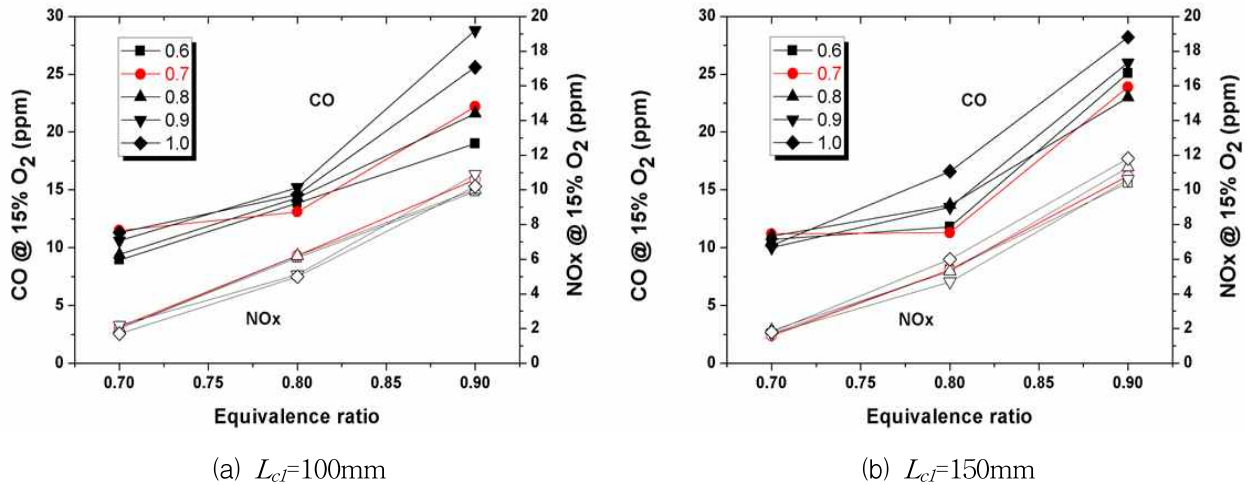


Fig. 5 CO and NOx emission with equivalence ratio for (a) $L_{cf}=100\text{mm}$, (b) $L_{cf}=150\text{mm}$.

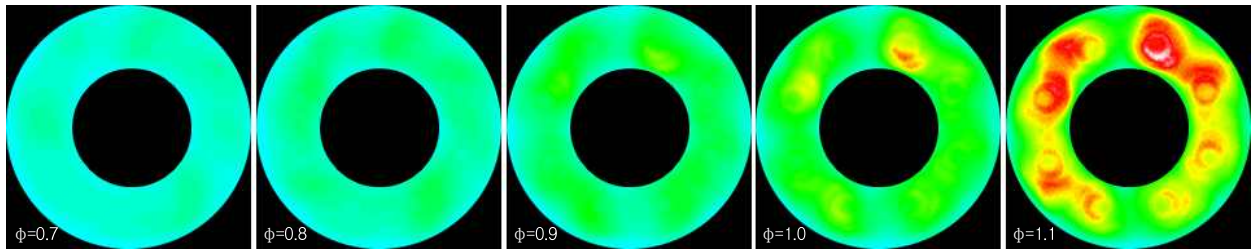


Fig. 4 Top view of the mean global OH* chemiluminescence at $L_{c2}/L_{cf}=0.7$ ($L_{c2}=70\text{mm}$, $L_{cf}=100\text{mm}$).

Figure 2를 살펴보면 당량비 0.7일 때 모든 L_{c2}/L_{cf} 에서 LF가 나타나고, 당량비 0.8일 때 모든 L_{c2}/L_{cf} 에서 PL이 나타난다. 그리고 당량비 0.9일 때 모든 L_{c2}/L_{cf} 에서 ST가 나타난다.

당량비 1.0에서부터 차이점이 나타나기 시작한다. $L_{c2}/L_{cf}=0.8-1.0$ 일 때 당량비 1.0에서 RR이 나타나기 시작하고, 당량비 1.1에서 RR이 뚜렷하게 나타나는데 비해, $L_{c2}/L_{cf}=0.6-0.7$ 에서는 L_{cf} 이 각각 100, 150mm일 때 서로 다른 경향을 보인다. $L_{c2}/L_{cf}=0.6-0.7$ 에서 $L_{cf}=100\text{mm}$ 일 때 당량비 1.0까지는 RR이 나타나지 않고, 당량비 1.1부터 RR이 나타나는데 비해, $L_{cf}=150\text{mm}$ 일 때에는 당량비 1.0부터 RR이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 당량비 1.0까지 RR이 나타나지 않았던 조건 중 $L_{c2}/L_{cf}=0.7$ ($L_{c2}=70\text{mm}$, $L_{cf}=100\text{mm}$)일 때 OH* 이미지를 취득하여 나타낸 것이다. 화염강도의 변화를 살펴보면 당량비 1.0까지는 비교적 화염의 발광강도가 균일한 분포를 가지는 반면 당량비 1.1에서는 불균일한 분포를 가지는 것을 알 수 있다.

Figure 5는 CO 및 NOx 배출성능을 검토하기 위하여, 열용량 5kW에서 $L_{cf}=100, 150\text{mm}$ 일 때 각각의 L_{c2}/L_{cf} 에 따른 CO 및 NOx 배기농도를

비교한 것이다. Figure 5 (a), (b)는 각각 $L_{cf}=100, 150\text{mm}$ 을 나타내며, 그래프 안의 범주는 $L_{c2}/L_{cf}=0.6-1.0$ 을 나타낸다. 전체적으로 당량비가 감소함에 따라 CO와 NOx 모두 감소하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한 당량비 0.8에서는 다른 L_{c2}/L_{cf} 에 비해 $L_{c2}/L_{cf}=0.7$ 일 때 CO가 가장 적게 배출되는 특별한 경향을 관찰하였고, 이를 $L_{cf}=100, 150\text{mm}$ 두 경우에서 모두 확인하였다.

본 연구에서 환형연소기의 실제 화염형상과 특성을 연구하기 위하여 독자 설계한 가스터빈용 모델 환형연소기에 대한 연소실의 길이비와 당량비에 관한 연구를 기술하였다. 이를 위해 환형연소기의 설계 및 운전조건에서 거시적인 화염의 거동을 살펴보고자 일차적으로 이들 인자들에 대한 화염의 형상을 가시화하였다. 또한 OH* 이미지를 취득하여 화염강도의 변화를 살펴보고, CO 및 NOx 배출성능을 검토하였다. 본 연구에서는 열용량 5kW, $L_{cf}=100\text{mm}$, $L_{c2}=70\text{mm}$, 당량비 0.9-1.0이 환형연소기 최적의 연소조건으로 확인되었으나, 당초 소형 분산발전용 저공해용 회박 연소기에 적합한 연소성능을 파악하기 위해서는 환형연소기 설계 및 운전 변수들에 대한 체계적인 영향력 조사가 필요하였다. 향후 계속해서 여러 설계인자들에 대한 실험

적 관찰을 통하여 환형연소기 최적화에 관한 연구를 수행해 나갈 것이다.

후 기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다. 과제번호 : (2014-2010-102780)

참고 문헌

- [1] 항공우주 추진기관 개론, 한국추진공학회, 한티미디어, 2008, pp.135-160
- [2] Philip Hill, Carl Peterson, Mechanics and

Thermodynamics of Propulsion, 1992, Addison Wesley

[3] O.Lucca_Negro, T.O'Doherty, "Vortex breakdown : a review", Progress in Energy and Combustion Science, 2001, Vol.27, pp.431-481

[4] Y.J. Park, S.H. Seo, "Design of an Annular Combustor for the Study of Transverse Combustion Instability", The Korean Society of Propulsion Engineers, Vol.18, 2014, pp.447-449

[5] J.Y. Kim, M.S. Jang, D.W. Lee and K.M. Lee, "A Study on the Characteristics of Model Annular Combustor for Gas Turbine (Part I : Flame Shape according to Combustion Conditions)", The Korean Society of Propulsion Engineers, Vol.19, 2015