

이중선회 확산화염의 화염특성에 관한 실험적 연구

최원재* · 이진호** · 김세원*** · 김경수*** · 류태우***

An Experimental Study on Combustion Characteristics of Double Swirl Diffusion Flame Burner

Won-Jae Choi, Se-Won Kim, Kyung-Su Kim Tae-U-Ryu, Jin-Ho Lee

Key Words: Swirl Combustor, NOx, Double Stage, Gas fuel

Abstract

This paper conducted experimental study of turbulent diffusion flame, equipped with a unique double swirler combustor for gas fuel. The burner has two vane swirlers which are fitted to primary, secondary air channel. Temperature, and NOx emission concentrations are measured in combustion flame region and velocity in cold flow for various primary/secondary air ratio conditions. The results showed the characteristics of swirl flame and decreasing NOx concentrations with increasing primary/secondary air ratio.

1. 서론

선회류는 Chigier 등⁽¹⁻³⁾에 의해 본격적으로 연구되기 시작하였고 이들의 연구에 의하여 선회류를 동반한 화염은 연료와 공기의 혼합을 향상시켜 연소 효율을 좋게 하고 중앙 재순환 영역을 생성하여 화염을 안정화시킨다고 알려졌다.

최근에는 공해물질의 저감에 대한 관

심에 따라 선회류를 동반해 NOx 생성을 줄이려는 연구가 진행되고 있다.⁽⁴⁾

화염의 안정화에 대한 연구로서 Gupta 등⁽⁵⁾은 다중 선회 연소기(Multi-annular swirl burner)가 기존의 단일 선회 연소기보다 화염안정도가 더 높다고 밝혔다. 또한 공해물질 저감을 위한 연소기술 개선의 방법중 하나인 단계적 연소(Staged Combustion)는 NOx 저감을 위한 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다.

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

*** 한국생산기술연구원

본 연구에서 설계한 이중 선회 연소기는 다중 선회 연소의 원리에 기초하고 단계적 연소의 효과를 얻을 수 있도록 제작하였고 보다 세부적인 선회 화염의 구조를 밝히기 위하여 화염장 내부의 유동, 온도 분포, 배가스 농도를 측정하였고 그 결과에 대해 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

선회기는 목부분에서 좁아지는 형상을 갖고 있으며 Fig. 1.에 연소기의 개략적인 형상을 나타내었다. 공기는 내측의 1차(primary)와 외측의 2차(secondary) 선회 날개를 통과하며 선회류로 바뀌고 내부 선회기의 선회각도는 30° , 외부 선회기의 선회각도는 45° 로 고정되어 있다.

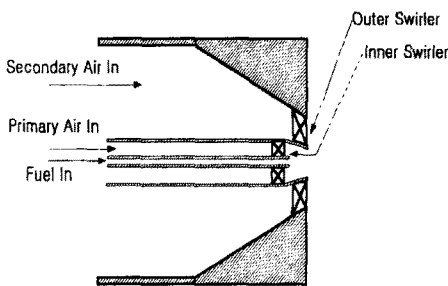


Fig.1. Double Swirl Burner

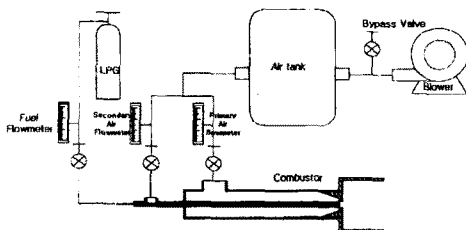


Fig.2. Schematic Drawing of Experimental Apparatus

연료 노즐은 내경 2mm이고 1차, 2차 공기 배출구는 각각 18mm, 27mm이다.

Fig.2.는 본 실험에 사용된 실험 장비의 개략도를 나타낸 것으로 1차, 2차 공기량을 임의로 조정할 수 있게 구성하였다.

연료는 LPG를 사용하였고 산화제인 공기는 맥동을 줄이기 위한 서지 탱크 (surge tank)를 거친 후 두 부분으로 나누어져 선회기의 1차, 2차로 공급된다. 공기의 유량은 오리피스형 유량계로 측정되고 밸브로 조절된다. 공기가 공기 유입구 부분에서 균일한 속도 분포를 유지하게 하기 위하여 공기 유입구 부분에 flow straightener(honeycomb)을 부착하였다.

노즐에서 분사된 연료는 선회기를 통과한 공기와 혼합하여 연소 반응을 일으킨다. 온도와 배가스는 2축 이송장치에 장착된 열전대와 배가스 채취용 프로브에서 계측된다.

본 연구에서는 유동이나 화염에 방해가 되지 않는 초소형 샘플링 프로브를 이용하여 질소 산화물 등의 화염장내 국소적인 배가스 분포를 정밀하게 계측하였고 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 배가스는 probe에서 채집된 후 온도 변화에 따른 화학 반응을 막기 위한 heating line을 통해 가스 분석기(Emirak III)로 들어간다.

또한 R type, 0.3mm직경의 열전대에

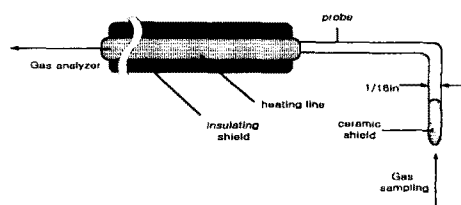


Fig.3. Micro probe for gas sampling

Table 1. Experiment Case of Double Swirl Burner

Case No.	Fuel	Primary Air	Secondary Air	Air ratio	A/F ratio
	\dot{q}_f ℓ/min	\dot{q}_p ℓ/min	\dot{q}_s ℓ/min	\dot{q}_p/\dot{q}_s	ϕ
1	4	40	200	0.2	0.40
2	4	50	200	0.25	0.38
3	4	60	200	0.3	0.36
4	4	70	200	0.35	0.35
5	4	80	200	0.4	0.34

애자에 끼워서 고온의 화염으로부터 보호하도록 제작한 열전대로 온도를 측정하였으며 PC의 AD board를 통해 일정 시간 동안의 측정 평균값을 구하였다.

유동은 Fog generator에서 미세 연기를 발생시켜 각각의 Fuel, Primary Air, Secondary Air 에 혼합시킨 후 PIV (Particle Image Velocimeter)를 통해 측정하였다. Image source인 Fog는 연소장에서는 증발되기 때문에 비연소장에서 측정하였다.

각각의 실험 조건은 Table 1.과 같다.

3. 실험 결과 및 고찰

각 case에 대하여 실험한 결과 가시적인 화염은 case 4의 경우에서 가장 안정적인 모습을 보였다. Air ratio(\dot{q}_p/\dot{q}_s)가 상대적으로 낮은 case 1-3의 경우는 화염의 중앙 부분에 적염이 형성되었다. 이것은 전체 화염의 전파속도에 비해 상대적으로 1차 공기의 유속이 작아 연료를 충분히 mixing 시키지 못해 국부적인 연료 과농영역이 생기기 때문이다.

또한 상대적으로 air ratio가 높은 case 5의 경우는 Fig.6 (e)의 경우에서 볼 수 있듯이 1차, 2차 공기 속도의 차가 커지므

로 연료의 혼합이 잘 안 이루어져서 화염이 불안정해진다. 실제로 air ratio가 0.4 이상이 될 때 소염되는 현상을 나타내었다.

3.1 온도 분포

Fig.4에 화염 내부의 온도 분포를 나타내었다. 화염의 모양은 air ratio가 높을수록 출구 온도가 낮아지고, 화염 길이가 짧아지고, 온도 최고점이 높아지는 경향을 보였다. 온도의 최고점은 대략 $z=15\text{mm}$ 부분에서 나타났다.

3.2 NOx 배출 농도 분포

Fig.5에 화염 내부의 NOx 분포를 나타내었고 15ppm 미만의 낮은 수준의 농도를 볼 수 있다. 전체적으로 $z=30\text{mm}$ 지점에서 가장 높은 농도를 보이고 있다. Air ratio가 높을수록 NOx 농도가 낮아지는 경향을 보이지만 1500℃ 이상의 고온의 영역에서는($z=15-30\text{mm}$) air ratio가 높아짐에 따라 NOx 농도도 함께 높아지는 것을 관찰할 수 있었고 이것은 1500℃ 이상에서는 Zeldovich 메카니즘이 활발히 일어나기 때문인 것으로 해석된다.

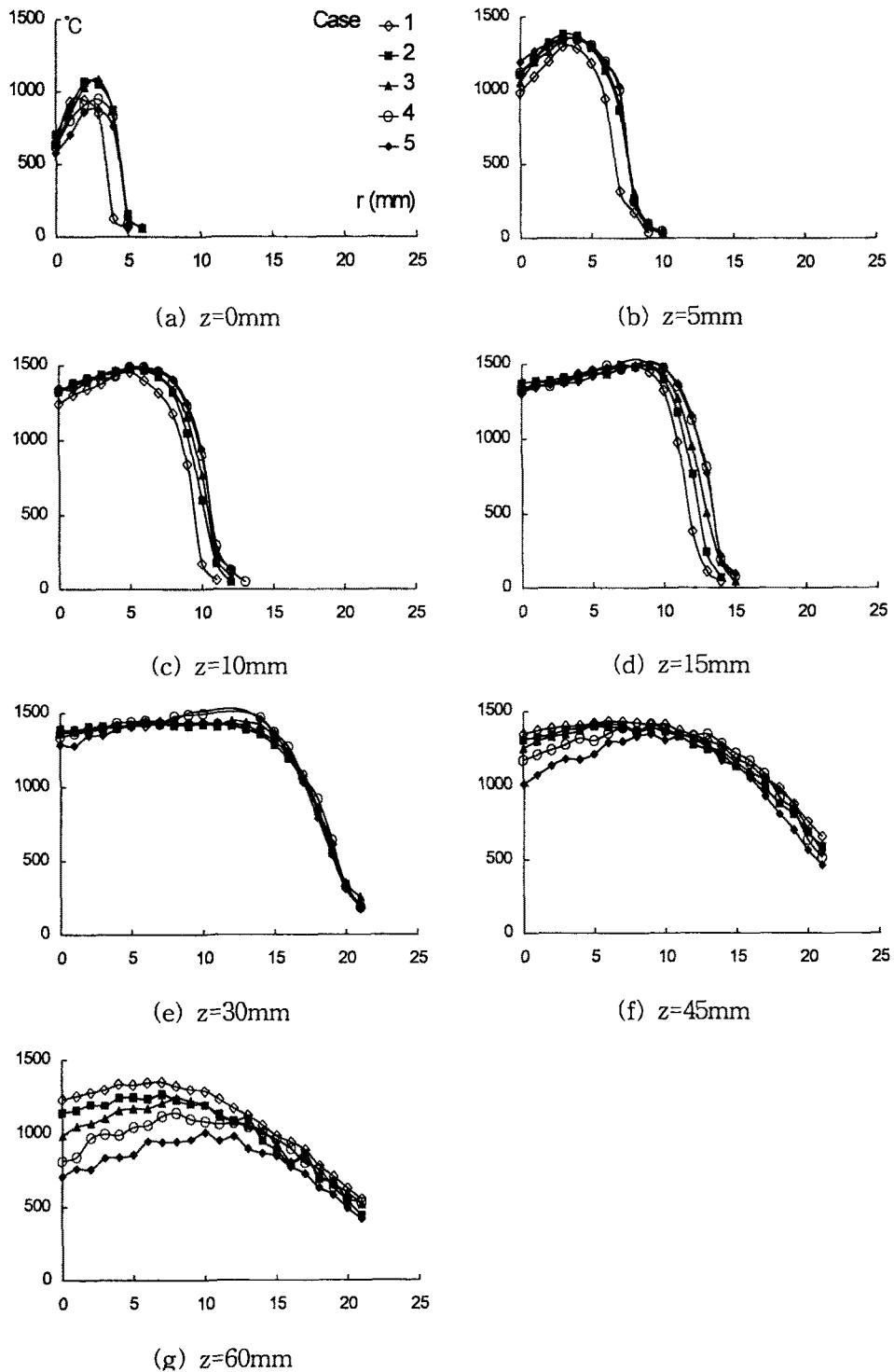
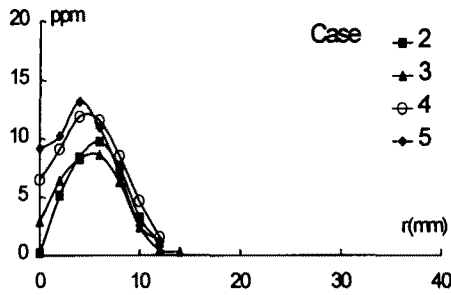
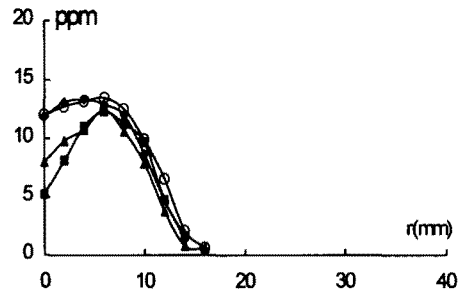


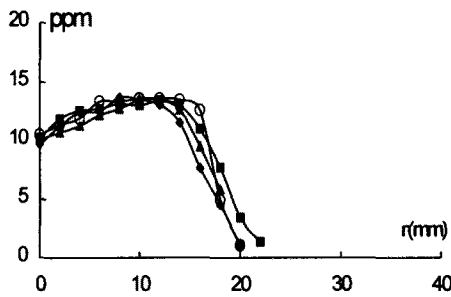
Fig.4. Mean Temperature Profiles of various case at each z position



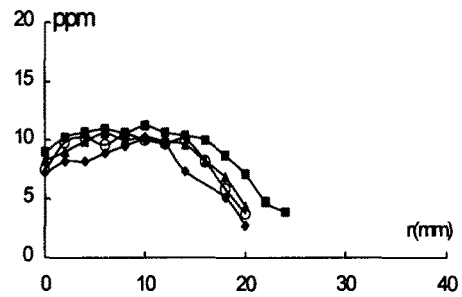
(a) $z=10\text{mm}$



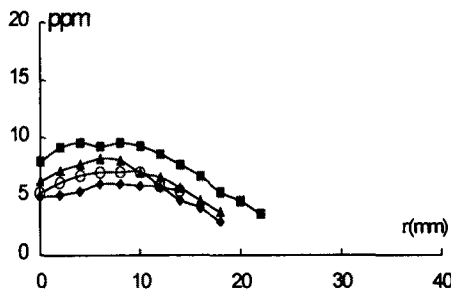
(b) $z=15\text{mm}$



(c) $z=30\text{mm}$



(d) $z=45\text{mm}$



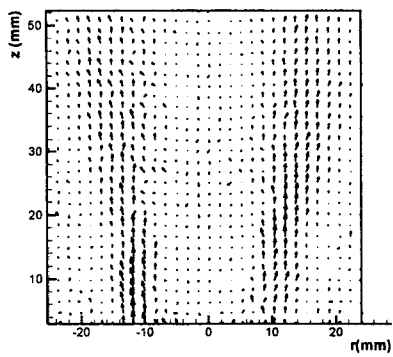
(e) $z=60\text{mm}$

Fig.5. NOx Concentrations of various cases at each z position.

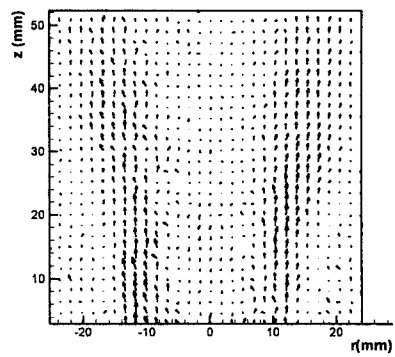
3.3 속도 분포

Fig.6에 화염장과 동일 영역에서의 비연소시 속도 백터를 나타내었다. air ratio가 높아질수록 중앙 재순환 영역이 발달하여 내부 mixing이 활발히 이루어 지지만(case 1-4), case 5의 경우에는는

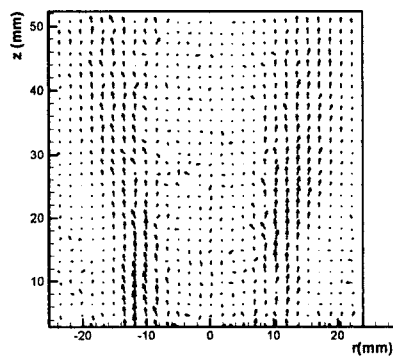
중앙에서의 혼합 특성이 나타나지 않게 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 화염의 소멸 가능성을 보여준다고 볼 수 있다.



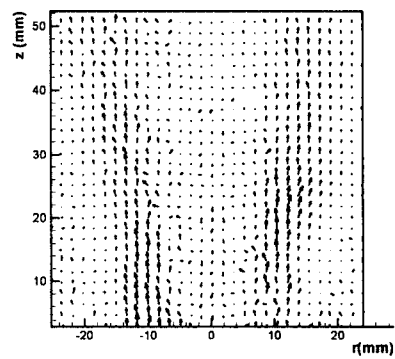
(a) Case 1



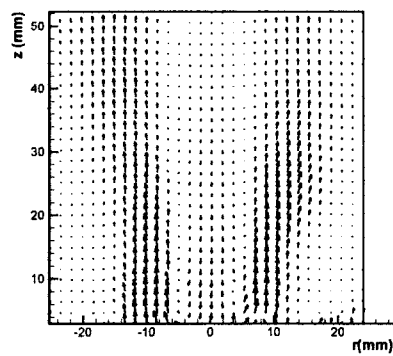
(b) Case 2



(c) Case3



(d) Case4



(e) Case5

Fig.6. Velocity Vectors of each cases.

3.4 결 과 고 찰

본 실험은 1차 공기보다 2차 공기를 월등히 많이 공급하는 조건으로 수행하였다. 이것은 전체 당량비에 큰 영향을

주지 않고 air ratio를 변화시킴으로써 이중 선회 연소 화염의 특성을 살펴볼 수 있도록 하였다.

실험 조건을 살펴볼 때 air ratio가 높아질수록 double swirl combustor의 특성을 더 잘 나타낸다고 볼 수 있고 위의 실험 결과로 기존의 선회기보다 더 낮은 NOx를 배출시킨다는 것을 알 수 있다.

또한 화염의 길이가 짧아지는 이점이 있으므로 기존의 연소로나 가스 터빈의 크기를 소형화하는 데에 효과적일 것으로 판단된다.

Multi-Annular Swirl Burner : Stability Limits and Emission Characteristics", 16th Symposium(International) on Combustion, pp. 79-91.

참고문헌

- (1). Chigier, N.A. and Beer, J.M., Combustion Aerodynamics, Applied Science, London, 1972.
- (2). Lilly, D.G., 1977, "Swirl Flow in Combustion : A Review", AIAA J., Vol. 15, No. 8.
- (3). Syred, N. and Beer, J.M., 1974. "Combustion in Swirling Flows : A Review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp.143-201.
- (4). Tacina, R.R., Low NOx Potential of Gas Turbine Engines, AIAA-90- 0550 , 1990
- (5). Gupta, A.K., Beer, J.M. and Swithenbank, J., 1977, "Concentric