

액체연료 무화염형성에 미치는 배기가스희석율의 영향

차천륜* · 이호연* · 황상순*†

Effect of exhaust gas dilution rate on formation of flameless combustion using liquid fuel

Chun Loon Cha*, Ho Yeon Lee*, Sang Soon Hwang*†

ABSTRACT

Flameless combustion, well known as MILD (Moderate Intensity Low oxygen Dilution) combustion or CDC(Colorless Distributed Combustion), is considered as one of the promising technology for achieving low NOx and CO emissions with improving thermal efficiency of combustion system. In this paper, the effects of exhaust gas dilution rate on formation of flameless combustion of liquid fuel were analyzed using three-dimensional numerical simulations for application of gas turbine combustor with high power density. Results show that the local high temperature region was decreased and flame temperature was spatially uniformly distributed due to higher dilution rate of burnt gas as similar pattern of gas phase flameless combustion. But the evaporation and mixing process of liquid fuel are found to be another important factors for formation of flameless combustion.

Key Words : Flameless, MILD combustion, Dilution rate

전 세계적으로 깨끗한 환경에 대한 관심이 높아지고 환경문제가 대두되면서 배기가스 배출량에 대한 규제들이 더욱 엄격해지고 있다. 이에 가스 터빈연소시스템에서 NOx, CO, Unburned hydrocarbon, Soot 등의 유해배기가스들을 줄이기 위한 여러 가지 새로운 연소기술들이 개발되어지고 있다. 특히 가스터빈의 경우 다단연소를 통하여 화염의 온도를 저감하여 NOx를 저감하는 연소기술과 희박 예혼합 연소(Lean Prevapozing Premixed)를 통하여 연료의 소비를 줄이며 NOx의 배출을 저감하는 연소기술에 대한 연구들이 진행되어지고 있다.[1] 그러나 이러한 연소기술들은 희박가연한계 부근의 당량비영역에서 연소가 진행됨에 따라 낮은 공해배출특성에도 불구하고 연소 불안정성이 높다는 단점을 가지고 있어 연소불안정성에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있다.[2-6] 최근 이러한 연소불안정성을 극복하며 낮은 배기가스 배출특성을 갖는 연소기술인 무화염 연소(Flameless combustion)에 대한 관심이 높아지고 있다. 무화염 연소기술은 연소로 발생된 기연가스의 강한 재순환을 통하여 산화제 및 연료를 희석하여 반응성을 감소시켜 저산소상태에서 연

소하는 방식이다. 이러한 방법을 통하여 국부적인 연소화염의 형태가 가열로 전체로 확장되어 1,400°C 이하의 온도분포를 형성하여 Thermal NOx의 배출을 근원적으로 방지하는 연소기술이다. 무화염 연소기술에 대하여 처음으로 연구한 Wüning[7]은 배기가스 재순환율(K_V)과 연소로 내부 온도로 나타내어지는 무화염 연소의 형성영역을 Fig.1과 같이 제시하였으며 여기서 배기가스 재순환율은 재순환하는 가스의 질량흐름율을 공급되는 연료와 산화제의 질량흐름율로 나눈 값으로 정의 하였다. Fig.1을 살펴보면 재순환율이 3이상 노의 온도가 연료의 자발점화온도 이상인 800°C 이상의 조건에서 무화염 연소를 형성함을 나타내었다. 이러한 높은 재순환률과 낮은 산소농도에 의한 화학반응의 지연과 재순환율을 극대화 시키려는 공기유입속도 증가에 의한 난류강도에 의한 특성시간(τ_{flow})을 화학특성시간(τ_{chem})으로 나눈 값이 Da (Damkohler)에 의하여서도 나타낼 수 있다.

$$Da = \frac{\tau_{flow}}{\tau_{chem}}, \tau_{flow} = \frac{L_T}{u}, \tau_{chem} = \frac{\delta_L}{S_L} \quad (1)$$

$$Da = \left(\frac{L_T}{\delta_L} \right) \left(\frac{S_L}{u} \right)$$

* 인천대학교 기계공학과

† E-mail : hwang@incheon.ac.kr

Tel : (032)835-8417 Fax : (032)835-0793

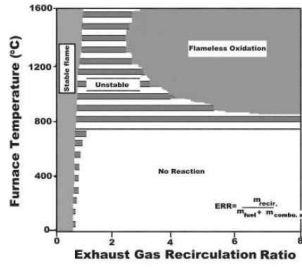


Fig. 1 Flameless combustion stability limits.

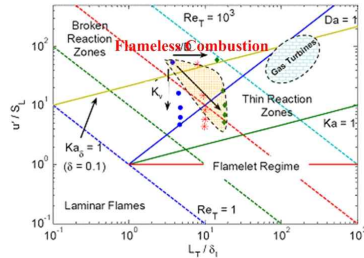


Fig. 2 Borghi Diagram of turbulent premixed combustion.

무화염에서는 현상적으로 재순환류에 의한 산소 농도의 감소와 재순환류에 의한 H_2O , CO_2 의 높은 분율에 의하여 화학특성시간이 길어지게 되어 난류에 의한 유동특성시간과 거의 같은 $Da=1$ 의 조건을 가지게 된다. 이를 Borghi Diagram에 표시하면 Fig.2에서 알 수 있듯이 거의 Broken Reaction Zone 혹은 Distributed Reaction Zone 영역에 위치하여 기존의 가스터빈엔진 연소영역에서 많이 나타나는 연소영역과는 다른 특성을 보여주고 있다. 이에 본 연구에서는 재순환률로 결정되는 재순환되어지는 기연가스량의 혼합정도가 액체연료를 사용한 무화염형성에 미치는 영향을 전산수치해석을 통하여 알아보았다.

전산수치해석은 상용 CFD코드인 ANSYS Fluent 15.0을 사용하였으며 사용된 모델로는 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였고, 화학종 보존방정식과 P1모델을 사용하여 화학반응과 복사열전달을 고려하였다. 또한 액체연료의 분사모델로 Lagrangian 방법으로 입자의 궤적을 계산하며 가스상과 운동량, 에너지, 질량을 서로 교환하는 DPM(Discrete Phase Model)을 사용하였다. 수치해석에 사용된 격자구조는 Fig.3과 같이 약 100,000개의 사각격자로 구성하였다. 계산에 적용된 혼합율의 각각의 화학종 조성비는 Table.1에 정리하여 나타내었다. 혼합율(ψ)이 '0'인 경우를 산화제로 산소(O_2)만을 사용하는 순 산소 연소로

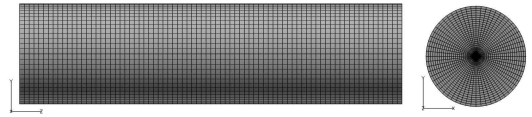


Fig. 3 Mesh structure of computational domain.

Table 1 Mass fraction of components for each dilution rate

	Dilution rate (ψ)				
	0	0.3	0.5	0.7	0.9
O_2	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1
CO_2	0	0.026	0.0435	0.061	0.078
H_2O	0	0.056	0.0935	0.131	0.169
N_2	0	0.218	0.363	0.508	0.653



Fig. 4 Predicted spray pattern of numerical spray model ($t=0.2ms$).

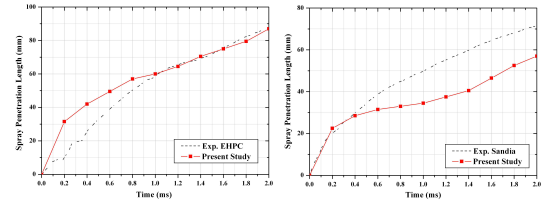


Fig. 5 Compare spray penetration length with numerical results and experimental results

생각하여 계산을 진행하였다.

먼저 액체연료를 사용한 무화염 수치해석에 앞서 분사모델의 검증에 하였다. Fig.4는 분사가 0.2ms진행되었을 때의 분사된 액적의 분포를 나타내었다. 액적의 분포를 살펴보면 분사된 액적의 분포모양이 분사모델에서 설정한 Solid cone의 형상을 잘 모사하고 있으며 분사각도 또한 설정한 분사각도 60° 의 부채꼴 모양이 잘 형성되어 있음을 확인하였다. 또한 Sandia National Laboratories와 EHPC(Eindhoven High Pressure Cell)의 노즐분사실험데이터와 분사거리비교를 통하여 액체연료분무모델의 검증을 실시하였다. Fig.5와 같이 시간에 따른 액적의 분사거리를 계산한 결과가 실험값과 비교적 잘 예측하고 있어 본 수치해석에 적용할 분사모델이 액체연료의 분사특성을 잘 예측함을 확인하였다.

각 혼합율에서의 계산결과를 Fig.6에 온도분포

로 비교하였다. 온도분포를 살펴보면 우선 산소연소의 영향으로 인하여 온도가 매우 높게 예측된 것을 볼 수 있다. 반면에 공급되어지는 산소+기연가스와 분사되는 액체연료인 등유의 온도가 낮으므로 고온의 온도장에 저온의 영역이 제트모양으로 형성되는 것을 알 수 있다. 이를 보다 자세히 분석하기 위하여 축방향의 중앙선을 따라 온도분포를 Fig.7 그래프로 나타내었다. 혼합율이 $\psi=0$ 일 때와 $\psi=0.3$ 인 경우는 반응온도가 5000K으로 고온의 국부적인 영역을 형성하는 것을 볼 수 있다. 그러나 기연가스의 혼합율이 50% 이상인 $\psi=0.5$ 와 $\psi=0.7$ 인 경우에는 국부적으로 고온인 영역이 줄어들며 온도분포가 비교적 균일해지는 것을 알 수 있다. 하지만 혼합율이 매우 높은 $\psi=0.9$ 조건에서는 상대적으로 부족한 산소의 영향으로 고온의 온도증가가 일어나지 않았다. 따라서 기연가스가 재순환되는 양이 50%에서 70%정도일 때에 무화염연소를 형성하기에 적합하다는 것을 확인하였다.

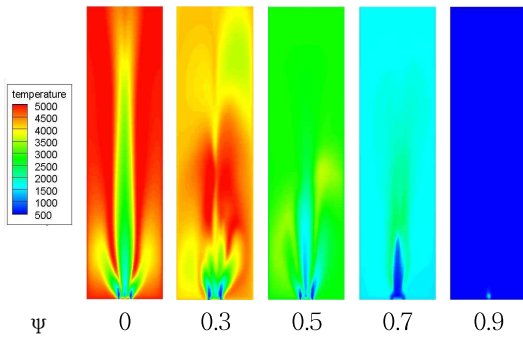


Fig. 6 Contour of Temperature for different dilution rate.

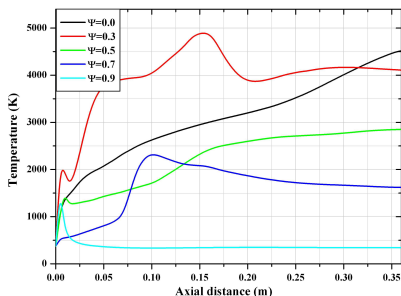


Fig. 7 Temperature distribution along the axial distance for different dilution rate.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013R1A1A2008833).

참고 문헌

- [1] A. Lacarelle, S. Goke, C.O. Paschereit, "A quantitative link between cold-flow scalar unmixedness and NOx emission in a conical premixed burner", Proceedings of ASME Turbo Expo, 2010, GT2010-23132.
- [2] A.M. Annaswamy, M. Fleifil, J.P. Hathout, and A.F. Ghoniem, "Impact of linear coupling on the design of active controllers for thermoacoustic instability", Combustion Science and Technology, vol.128, pp.131-180, 1997.
- [3] J.P. Hathout, M. Fleifil, A.M. Annaswamy, and A.F. Ghoniem, "Active control of combustion instability using fuel-injection in the presence of time-delays", AIAA Journal of Propulsion and Power (inpress), 2002.
- [4] M. Fleifil, J.P. Hathout, A.M. Annaswamy, and A.F. Ghoniem, "The origin of secondary peaks with active control of thermoacoustic instability", Combustion Science and Technology, vol.133, pp.227-265,1998.
- [5] K. Ogata, Modern Control Engineering. third edition, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1997.
- [6] J. Hermann, A. Orthmann, S. Hoffmann, and P. Berenbrink, "Combination of active instability control and passive measures to prevent combustion instabilities in a 260 mw heavy duty gas turbine", in NATO RTO/AVT Symposium on Active Control Technology for Enhanced Performance in Land, Air, and Sea Vehicles, Braunschweig, Germany, May 2000.
- [7] J. A. Wüning and J. G. Wüning, "Flame-less oxidation to reduce thermal No-formation", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, NO. 1, pp. 81-94, 1997/29.
- [8] Wüning, Joachim G., "FLOX®- Flameless Combustion", Therm® Process Symposium, 2003.
- [9] Weber, Roman, smart, John P., Kamp, Willem vd, "On the (MILD) Combustion of Gaseous, Liquid, and Solid Fuels in High Temperature Preheated Air", Proceedings of the Combustion Institute 30, pgs. 2623-2629, 2005.