

무화염 형성에 영향을 미치는 유동조건에 대한연구

홍성원* · 이필형* · 차천륜* · 송기종* · 임현진* · 황상순**

Affect of Flow Condition on Formation of Flameless Combustion

Seong Weon Hong*, Pil Hyong Lee*, Chun Loon Cha*, Ki Jong Song*,
Hyun Jin Im*, Sang Soon Hwang**

ABSTRACT

The flameless combustion has been considered as one of the promising combustion technology for high energy efficiency and reducing NOx and CO emissions. To investigate the effects of fluid conditions on the formation of flameless combustion, a numerical approach was performed. The flameless combustion possesses lower temperature region and more uniform temperature distribution than conventional flame. The results show that the flow rate of the system which mainly influence on recirculation ratio is the most important parameter for flameless combustion.

Key Words : Flameless Combustion, High energy efficiency, NOx, CO, Recirculation

전 세계적으로 환경문제가 대두됨에 따라 배기가스 배출량에 대한 국제규제를 더욱 엄격하게 규정하고 있다. 우리나라 또한 배기가스 규제대상국으로 지정될 가능성이 높아 배기가스 저감에 대한 연소기술개발이 필요한 상황이다.

국가에너지원 소비의 30%를 차지하는 제철제강 산업에서 국제규제에 충족하는 연소시스템의 개발 및 배기가스 절감은 매우 중요한 부분이다. 현재 제철제강산업에서 사용되는 축열식 연소시스템의 경우 고온의 배기가스와 공기와의 열 교환을 통하여 효율을 증가하는 방법이다. 하지만 이러한 축열식 시스템의 경우 버너설비의 고가, 내구성, 설비의 대형화, 유지보수등의 문제점을 가지고 있다. 순산소 연소시스템은 산화제를 산소를 사용하여 NOx배출을 감소시키는 방법이다. 이러한 순산소 연소방식은 국부적인 온도장에 의해 노벽의 손상, Air Leak상황에서 높은 NOx 배출의 문제점을 가지고 있다.

따라서 생산성이 높고 화염 안정성이 뛰어난 고온의 버너 개발 필요성이 대두되고 있으며 Flameless Combustion System으로 문제를 해결하고자 하였다[1-2]. Flameless Combustion System은 1997년 독일 *Wünnig* [3]등에 의해 Flameless Oxidation이라 명명된 기술로 노 내부에 Recirculation 유동을 형성하여 재순환된 배기가스가 연소로에 공급되는 연료와 산화제와 혼합하여 희석시켜 전체 온도를 낮추고 공간적으로 온도가 균일한 Volume Combustion의 형태를 형성하는 방식이다. 따라서 Flameless Combustion System은 국부적인 가열을 피할 수 있고 시스템을 소형화시킬 수 있어 기존연소 시스템의 문제점을 해결할 수 있다. Flameless Combustion System은 *Wünnig* 이후에도 *Szegö*[4], *Gupta* [5], *Schéele*[2] 등이 실험 및 수치해석을 통한 연구개발을 진행하고 있다. 본 연구실에서는 산소를 산화제로 사용하여 Flameless Combustion을 형성 하였으며 고당량비 조건에서 산소를 활용한 Flameless Combustion을 연구하고 있다.

[6] 본 연구에서는 공급되는 공기의 온도변화 및 공기/연료의 유량변화가 Flameless Combustion 형성에 미치는 영향을 수치해석 및 실험을 통하여 연구하였다. Flameless Combustion System의 수치해석을 위하여 상용전산프로그램인 Ansys Fluent를 사용하였다. 수치해석은 3차원 정상상태로 가정하였고 질량, 운동량, 에너지, 화학종보존 방정식 및 열전달 방정식을 적용하였다. 수치해석은 Realizable k- ϵ 난류 Model과 P1 Radiation Model을 적용, 연소모델은 EDC (Eddy Dissipation Concept)를 사용하였다.

* 인천대학교 기계공학과

† E-mail : hwang@incheon.ac.kr

Tel : (032)835-8417 Fax : (032)835-0772

Table.1 Operation conditions

Case	Heat Load (kW)	Equivalence Ratio (ϕ)	Preheating Temperature	Fuel Injection Velocity(m/s)	Air Injection Velocity(m/s)
1-1	10	0.6	673K	6.04	131.55
1-2	10	0.7	673K	6.04	112.76
1-3	10	0.8	673K	6.04	98.66
2-1	7	0.6	673K	4.23	92.08
2-2	7	0.7	673K	4.23	78.93
2-3	7	0.8	673K	4.23	69.06
3-1	10	0.6	300K	6.04	58.64

Flameless Combustion에서 발생하는 화학반응을 해석하기 위하여 22개의 화학종과 104개의 화학반응단계로 구성된 GRI-MECH 1.2 화학방정식을 사용하였으며 표.1과 유량조건 및 온도조건에서 수치해석을 진행하였다. 수치해석에 사용된 연소로의 형상은 $0.1m \times 0.1m \times 0.35m$ 로 설정하였고 두께 $0.05m$ 의 단열체와 $0.01m$ 의 스테인리스를 모두 적용하여 수치해석을 진행하였다. 노즐의 경우 중앙에 직경 $10mm$ 의 공기노즐과 직경 $4mm$ 의 연료노즐을 적용하였다. 연료노즐의 경우 90° 간격으로 4개를 형성하였고 공기노즐과 중심거리는 $0.03m$ 로 설정하였다. 공급되는 연료유량은 산업용로에 사용하는 Low Intensity($5MW/m^3$) 영역에 포함되는 $7kW(2MW/m^3)$ 및 $10kW(2.86MW/m^3)$ 로 결정하였다. 수치해석을 진행하기 전 수치해석에서 설계한 동일한 형상의 연소로에서 열용량 $7kW$, 당량비 0.54 에서 Flameless Combustion을 확인하였고 실험결과를 그림.1에 비교하였다.



Conventional flame Flameless combustion
Fig. 1 Comparison of conventional flame and flameless combustion

실험을 통하여 Flameless Combustion이 형성을 확인하였고 이를 바탕으로 당량비 변화가 무화

형성에 미치는 영향을 분석하여 그림.2와 그림.3에 비교하였다.

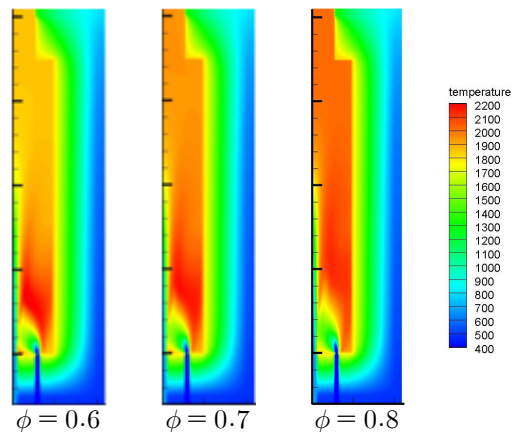


Fig. 2 Comparison of temperature contours for case 1-1,1-2 and 1-3

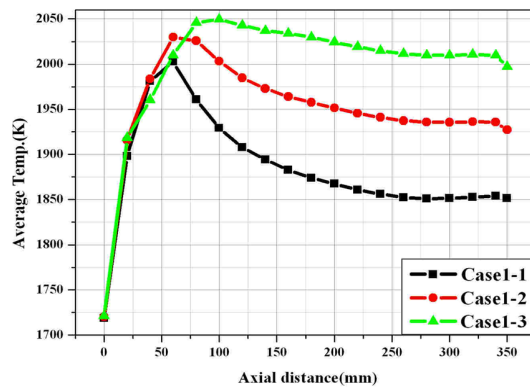


Fig.3 Average temperature along the z-direction for case 1-1, 1-2 and 1-3

그림.2와 그림.3을 살펴보면 당량비가 0.8에서 0.6으로 변화되면 공급되는 공기의 유량이 증가되어 연료가 Entrainment 되는 구간이 낮아져 화염의 길이가 짧아지고 폭이 좁아짐을 확인 하

였다. 또한 연소로의 상단에서 온도분포는 당량비 0.6에서 가장 낮은 분포를 보였다. 이러한 원인은 화염의 영향과 공급되는 공기유량의 증가로 연소로 전체에 주입되는 전체유량이 증가되어 기연가스의 체류시간이 감소하기 때문이라 판단된다.

당량비 변화에 따른 연소로 온부분포 비교에 이어 열용량 변화에 따른 유동장의 평균온도를 표.2에 비교하였다. 표.2를 살펴보면 열용량이 10kW에서 7kW로 변화되어도 평균온도의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 당량비가 높을수록 평균온도가 증가됨을 확인할 수 있었다. 이러한 원인은 모든 연료는 단열화염온도를 가지고 있어 열용량이 변화하여도 동일 당량비 조건에서는 동일한 단열화염 온도를 가지기 때문이라고 판단된다.

Table.2 Fluid average temperature

Case	Heat Load (kW)	Equivalence Ratio (ϕ)	Temperature(K)
1-1	10	0.6	1886.9
1-2	10	0.7	1955.9
1-3	10	0.8	2007.9
2-1	7	0.6	1891.9
2-2	7	0.7	1950.5
2-3	7	0.8	2007.7

마지막으로 공기예열이 무화염 형성에 미치는 영향을 비교하기 위하여 그림.4에 공기예열조건인 Case1-1과 공기예열이 없는 Case3-1을 비교하였다. 그림.4를 살펴보면 Case3-1에서 Case1-1에 비하여 낮은 온도분포를 보이지만 Flameless Combustion의 특징인 Volume Combustion의 균일한 온도분포가 형성되지 못하였다.

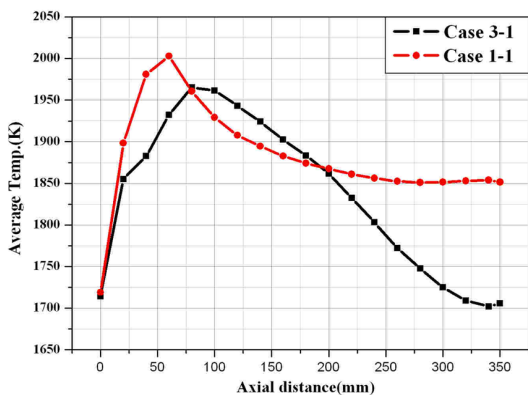


Fig.4 Comparison of the temperature distribution of case1-1 and case3-1

이러한 원인은 *Wunning* [3]이 제시한 Flameless Combustion형성을 위한 재순환율로 설명할 수 있다.

$$K_V = \frac{\dot{M}_E}{\dot{M}_F + \dot{M}_A}$$

Case1-1과 Case3-1의 공급되는 연료 및 공기의 유량은 동일하기 때문에 재순환율의 결정은 재순환되는 배기가스의 유량을 통하여 결정되어진다. 따라서 재순환되는 배기가스의 유량을 그림.5에 비교해보았다. 그림.5를 살펴보면 Case1-1의 배기가스 재순환 유량이 Case3-1에 비하여 최대 2배정도 많음을 확인하였다. 따라서 재순환되는 유량이 많은 Case1-1조건에서 보다 균일한 온도분포를 가진다고 판단하였다.

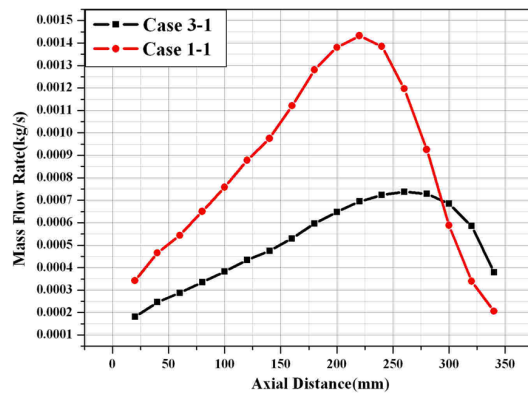


Fig.5 Case1-1 and case3-1 are compared according to the z-direction of the mass flow of recirculated exhaust gas

수치해석의 결과를 통하여 무화염 형성에 미치는 유동조건 중 가장 중요한 요인은 유속임을 확인하였다. 유속이 증가되면 Entrainment되는 구간이 낮아져 화염이 짧아지고 낮은 평균온도 분포가 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 유속이 증가되면 재순환되는 배기가스의 유량이 증가하기에 무화염 형성을 위해서는 유속을 증가시키는 것이 유리하다고 판단된다.

참고 문헌

[1] Anne Giese, Uwe Konold, A. Al-Halbouni and Klaus Görner, "Application of Flameless Oxidation in Glass Melting Furnaces-Glas FLOX(R)", 7th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, 2008
 [2] Joachim von Schéele, Mats Gartz, Rainhard Paul, Michael T. Lantz, Jean Pierre

Riegert and Stephan Söderlund, "Flameless oxyfuel combustion for increased production and reduced CO₂ and NO_x emission", Stahl undeisen, Vol. 128, Nr. 7. 2008

[3] 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, 199729.

[4] G.G. Szegö, B.B. Dally and G.J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", Combustion and Flame, Vol. 156, No. 2, pp. 429-438, 2009

[5] Vaibhav K. Arghode, Ashwani K. Gupta, "Effect of flow field for colorless distribution(CDC) for gas turbine combustion", Applied Energy, Vol. 87, pp. 1631-1640, 2010

[6] 차천륜, 이필형, 홍성원, 황상순, 형상 및 작동 조건의 변화가 순산소 무화염 형성에 미치는 영향, 43회 KOSCO 추계학술대회, pp.183~188

[7] 황찬환, 백승욱, 김학영, "동축공기에 따른 Mild 연소의 열적 특성에 대한 수치연구", 한국 연소학회지, Vol. 15, No. 4, pp.1-8, 2010