

반응물 분사조건에 따른 무화염 연소특성 연구

홍성원* · 이필형* · 황상순**†

Combustion Characteristics of Flameless Combustion by Reactants Injection Conditions

Seong Weon Hong, Pil Hyong Lee and Sang Soon Hwang

ABSTRACT

The flameless combustion has been considered as one of the promising combustion technology for high thermal efficiency, reducing NOx and CO emissions. In this paper, the effect of air and fuel injection condition on formation of flameless combustion was analyzed using three dimensional numerical simulation. The results show that the high temperature region and the average temperature was decreased due to increase of recirculation ratio when air velocity is increased. The average temperature was also affected by entrainment length. Generally mixing effect was enhanced at low entrainment length and dilution was dominated at high entrainment length. This entrainment length was greatly affected by air and fuel injection velocity and distance between air and fuel. It is also found that the recirculation ratio and dilution effect were generally increased by entrainment length and the recirculation ratio, mixing and dilution effect are the significant factor for design of flameless combustion system.

Key Words : Flameless combustion, Entrainment effect, Mixing effect, Dilution effect, Injection condition

기 호 설 명

T_{Ave} : Average Temperature (K)	Z_I : Entrainment Length (mm)
D_a : Air Nozzle Diameter (mm)	K_V : Recirculation Ratio
D_f : Fuel Nozzle Diameter (mm)	MW/m^3 : Heat Intensity
S : Distance between Nozzles (mm)	ϕ : Equivalence Ratio

1. 서론

탄화수소계 화석연료의 연소기술은 세계 에너지의 약 90% 이상을 차지하고 있지만 이산화탄소 등의 온실가스 배출의 주요 원인으로 알려져 있어 전세계적으로 온실가스의 감축 및 탄화수소계 연료의 효율향상을 위한 연구가 진행되고 있다[1,2].

현재 국가 전체에너지소비의 30%를 차지하는 제철제강산업의 경우 생산과정 대부분이 산업용로에 설치된 연소기를 통한 가열 또는 용융과정을 사용하고 있어 이산화탄소 배출량이 상대적으로 매우 높은 실정이다.

근래에 들어 제철제강산업의 산업용로에 적용되는 연소시스템의 효율을 향상하기 위하여 연소 후 배출되는 고온의 배기가스와 공급되는 산화제의 열교환을 통하여 에너지 효율을 향상하는 축열식 연소시스템에 대한 연구가 진행되고 있다[3]. 하지만 축열식 연소시스템의 경우 축열설비의 가격, 내구성 및 설비의 대형화에 따른 문제점이 발생하고 유지보수에 어려움이 있어 높은 에너지 절감효과에도 불구하고 현장에서의 폭넓은 사용에 많은 제한사항이 존재한다.

제철제강 산업용로에 적용되는 연소시스템의 문제를 해결하기 위하여 최근 들어 무염연소(Flameless Combustion) 방식에 대한 연구가 진행되고 있다. 무염연소는 현재 연구되고 있는 연소기술 중 가장 주목받는 기술로서 높은 열효율과 배기가스 배출량을 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다고 알려져 있다[4].

* 인천대학교 기계공학과 대학원

** 인천대학교 기계시스템공학부

† 연락저자, hwang@incheon.ac.kr

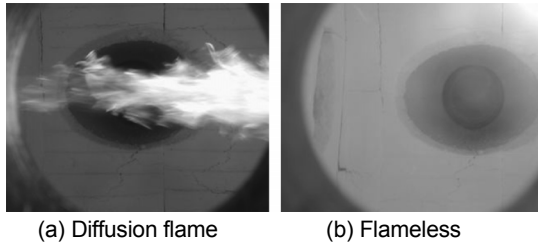


Fig. 1. Comparison of diffusion flame and flameless combustion.

무염연소의 특징을 살펴보기 위하여 확산연소의 연소화염과 무염연소의 연소화염을 형태를 Fig. 1에 비교하였다. Fig. 1(a)와 같이 국부적인 발광하는 전형적인 확산화염버너의 화염형태가 동일 조건의 무염화염조건에서는 Fig. 1(b)와 같이 화염이 존재하지 않고 전 연소장에 걸쳐 최고온도가 낮은 볼륨연소의 형태를 형성한다.

이러한 무염화염 연소방식은 1997년 Wüning에 의하여 Flameless Oxidation이라 명명되었고 연소장 내부의 배기가스의 재순환을 통하여 균일한 온도의 체적연소가 가능함을 확인하였다[5]. 이와 같은 무염화염의 특성은 산화제의 강한 운동량(Momentum)에 의하여 배기가스가 재순환이 되어 공급되는 공기와 혼합되어 산소농도를 낮추게 된다. 또한 재순환을 통하여 배기가스와의 공기의 열교환을 통해 산화제의 온도가 증가되어 안정적인 연소가 가능하게 된다. 배기가스의 재순환을 통하여 반응영역이 넓어지고 고온의 화염집중 현상이 감소하여 균일한 온도분포를 형성할 수 있어 연소온도에 직접적으로 영향을 받는 NO_x의 배출량이 감소된다[4,6].

이러한 무염화염의 특징을 산업용로에 적용하기 위하여 국내·외의 관심이 집중되고 있고 무염화염

의 형성을 위한 최적조건을 파악하기 위한 다양한 실험 및 전산해석 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다[7-9].

Szegö는 연료 분출(Jet)과 산화제 분출의 모멘텀 비율과 유입길이(Entrainment Length)에 따른 화염안정영역에 대하여 수치해석 및 실험을 통해 확인하였다[10]. Jianchun은 유입길이에 따른 재순환율의 변화 및 희석(Dilution)의 영향에 대한 연구를 통하여 재순환율(Recirculation Ratio)과 유입길이(Entrainment Length)의 관계를 수식화 하였다[11].

본 연구에서는 상온상태의 산화제와 연료의 작동 조건변화가 무염화염형성에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 연구하였다. 산화제와 연료노즐의 직경 변화, 노즐간의 간격의 변화, 당량비 변화가 재순환율과 유입길이변화에 미치는 영향을 상호 비교분석하였다. 수치해석을 진행하기 위하여 상용전산수치해석 프로그램인 Ansys Fluent 13을 적용하였다.

2. 수치해석

2.1. 연소로 모델링

수치해석을 진행하기 위하여 Fig. 2와 같은 형상의 Lab Scale 연소로를 가로, 세로, 높이가 각각 220 × 220 × 470 mm로 설계하여 적용하였다. 연소로는 50 mm의 단열재 및 10 mm의 Stainless Steel로 감싸져 있는 구조로 설계하여 열손실에 대한 영향을 최소화할 수 있도록 구성하였고 수치해석에서도 연소실 벽면을 단열재 형상을 고려하여 연소로를 모델링하였다. 단열재와 Stainless Steel의 열전달계수는 각각 0.18 W/mK과 21.4 W/mK을 사용하였고 Stainless Steel 외부의 경우 공기와의 자연대류를 고려하여 수치해석을 진행하였다. 수치해석에 적용된 연소로는 수치

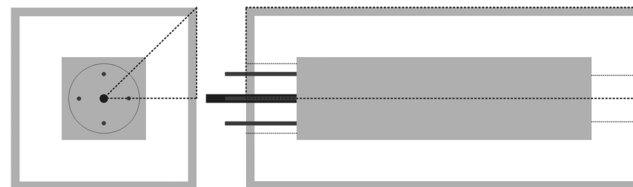


Fig. 2. Schematics of furnace.

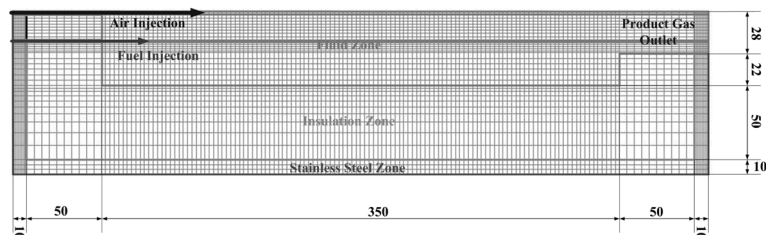


Fig. 3. Computational grid.

해석의 시간을 단축하기 위하여 Fig. 2에 점선부분에 대칭경계조건을 적용하여 사각연소로의 1/8만을 사용하여 수치해석을 진행하였다.

수치해석에 적용된 연소로의 격자구조를 나타낸 Fig. 3을 살펴보면 수치해석의 사용에 있어 가장 적합한 격자구조인 사각격자를 사용하여 연소로를 구성하였고 격자의 개수는 총 78,000개이다. 연소로 내부의 화염 반응영역의 평균 격자의 크기는 $4.735 \times 10^{-8} \text{m}^3$ 이고 출구부분의 평균격자의 크기는 $1.17 \times 10^{-8} \text{m}^3$ 로 구성되어 수치해석을 진행하였다.

2.2. 연소기 모델링

본 수치해석에 사용된 무연화염버너는 연소로의 하단부에 설치되며 형상은 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 무연화염버너를 살펴보면 산화제노즐직경을 D_a , 연료노즐직경을 D_f , 노즐간의 중앙에서의 간격을 S 로 지정하였다. 연료노즐 4개는 산화제노즐을 90° 각도로 산화제노즐을 감싸고 있다. 산화제노즐의 직경은 3, 5, 7, 10 mm, 연료노즐의 직경은 1, 2, 3, 4 mm, 노즐간의 간격은 10, 20, 30 mm로 변경하면서 수치해석을 진행하였다.

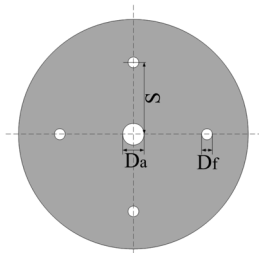


Fig. 4. Schematics of flameless burner.

Table 1. Operation conditions

	$D_a(V_a)$	$D_f(V_f)$	S	ϕ
Effect of D_a (Case 1)	3(196.4)	1(33.15)	20	0.7
	5(70.7)			
	7(36.07)			
	10(17.6)			
Effect of D_f (Case 2)	3(196.4)	1(33.15)	20	0.7
		3(3.68)		
		4(2.07)		
Effect of S (Case 3)	3(196.4)	1(33.15)	10	0.7
			20	
			30	
Effect of ϕ (Case 4)	3(229.1)	1(33.15)	30	0.6
	3(196.4)			0.7
	3(171.9)			0.8

2.3. 가동조건

연료유량을 결정하기 위하여 산업용로의 부하강도(Intensity)를 확인하였다. 일반적인 산업용로의 부하강도는 $0.1\text{-}1 \text{ MW/m}^3$ 영역에서 존재하고 있어 본 수치해석에 적용된 연소로의 크기를 고려하여 부하강도 1 MW/m^3 조건에서 연료유량을 결정하였다[12]. 산화제 및 연료노즐의 직경변화, 노즐간거리변화 및 당량비 변화에 따른 자세한 유량조건은 Table 1에 표시하였다. 수치해석에 적용된 연료는 도시가스의 주성분인 메탄(CH_4)을 단독으로 사용하였다. 공급되는 산화제와 연료의 온도는 300 K 으로 예열되지 않는 조건에서 수치해석을 진행하였다.

2.4. K_V 및 Z_f 의 정의

무연화염형성에서 영향을 미치는 중요한 인자로는 배기가스의 재순환율(K_V , Exhaust gas recirculation)과 Fig. 5에 정의되어 있는 유입 길이(Z_f , Entrainment length)라고 할 수 있다.

재순환율의 계산은 Wünnig의 공급되는 산화제와 연료의 질량유량의 합과 재순환되는 배기가스의 질량유량의 비로 정의된 식 (1)을 사용하였다[5].

$$K_V = \frac{\dot{m}_r}{m_a + m_f} \quad (1)$$

유입 길이(Entrainment length)는 X-Y평면에서 Z축 방향으로의 속도분포의 Peak점이 1개만 생기는 Z축의 가장 낮은 높이에서 결정된다. 식 (2)는 Grandmaison의 연구를 통하여 연료와 산화제의 모멘텀의 비를 적용하여 유입 길이를 계산하는 이론식이다[13].

$$Z_f \approx C \left(\frac{G_f}{G_a} \right)^{1/4} S \quad (2)$$

식 (2)에서 본연구의 작동조건에 포함될 수 있게 연료(G_a) 및 산화제(G_f)의 모멘텀을 당량비, 온도, 연료 및 산화제의 직경비로 변경하면 식 (3)으로 변경된다.

$$Z_f \approx C \phi^{1/2} \gamma^{-1/2} \left(\frac{T_f}{T_a} \right)^{1/4} D_a^{1/2} D_f^{-1/2} S \quad (3)$$

식 (3)의 ϕ 와 γ 는 당량비 및 이론혼합비이고 C 는 실험 및 수치해석을 통하여 얻어지는 상수로 본 논문에서는 4.9를 사용하였다[11].

또한 유입길이는 X축에서 Z축 방향으로의 속도 가 최고점이 1개만 존재하는 최저 높이로 수치해석

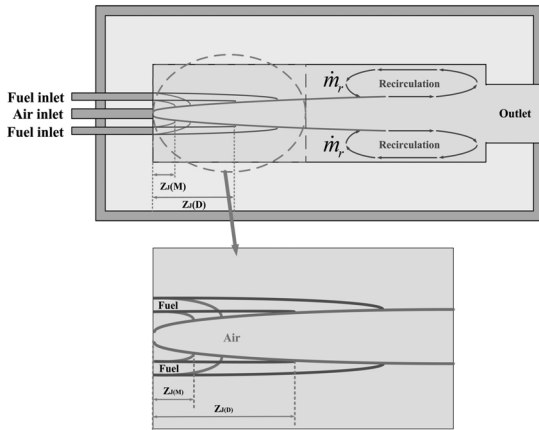


Fig. 5. Definitions of entrainment length and exhaust gas recirculation.

결과를 통하여 얻을 수 있다[11]. 산화제 및 연료의 유속에 따라 Z_j 가 짧아져 Fig. 5에서 보는바와 같이 $Z_{j(M)}$ 이 되었을 때 산화제에 연료가 바로 빨려 들어가는 혼합효과(Mixing)가 주된 영향이 나타내는 경우와 유입길이 길어 산화제와 연료가 혼합되지 못하는 $Z_{j(D)}$ 와 같이 희석효과(Dilution)가 주된 영향을 나타내는 것을 기존의 배기가스의 재순환율과 병행하여 분석하였다.

2.5. 수치해석 연소모델

무염화염버너의 수치해석은 3차원 정상상태조건에서 질량, 운동량, 에너지, 화학종 보존 방정식 및 열전달 방정식을 적용하여 진행하였다. 수치해석에 적용된 난류 모델은 무염화염조건을 보다 잘 나타낼 수 있다고 알려진 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고[14], Radiation 모델과 연소모델은 각각 P1 모델과 EDC(Eddy Dissipation Concept) 모델을 적용하였다. 무염화염수치해석에 적용된 화학방정식은 22개의 화학종과 104개의 반응식으로 구성된 GRI 1.2 Mechanism을 사용하였고 NOx 모델은 Ansys Fluent에서 제공되는 NOx 반응식을 사용하였다. 산화제 및 연료는 질량유량조건으로 공급하고 출구에서는 압력경계조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산화제노즐 직경변경에 따른 영향

중앙에서 분출되는 산화제의 유속변화에 따른 효과를 알아보기 위하여 연료노즐과 노즐간의 거리를 각각 1 mm와 20 mm로 고정하고 산화제 노즐직경을 10 mm에서 3 mm로 변경하여 산화제 유속을 증가시키면서 수치해석을 진행하였다.

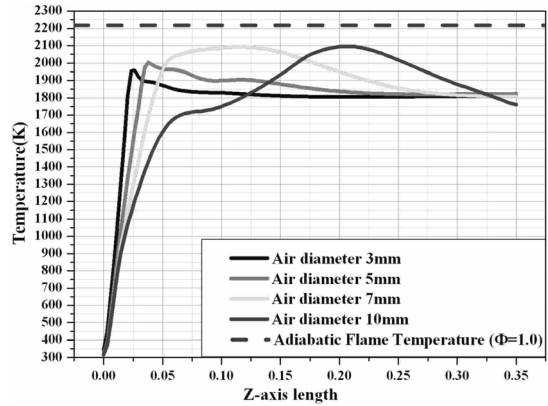


Fig. 6. Comparison of temperature profile at the fuel nozzle center line by different air nozzle diameter at Case 1.

Fig. 6은 연료노즐 중심($X=20$ mm)에서 Z축 방향으로 연소장의 높이에 변화에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 6을 살펴보면 산화제노즐의 직경이 10 mm에서 3 mm로 작아지면서 유속이 증가함에 따라서 연소반응이 연소장 입구에서 빠르게 일어난다. 따라서 최고온도에 이르는 영역이 연소장의 하단에 가깝게 형성된다. 또한 최고온도가 낮아지며, 일반적으로 NOx 생성한계온도인 1,800 K 이하의 낮은 온도를 일정하게 유지하는 영역이 넓어진다. 이런 온도변화를 가지는 연소장 내부의 온도분포를 Fig. 7에서 살펴본 결과 산화제노즐의 직경이 10 mm에서 3 mm로 작아지면 연소장 내부의 1,800 K 이상의 높은 화염온도 영역이 연소로의 입구부에 집중되어 좁아지며, 산화제노즐의 직경이 큰 경우보다 비교

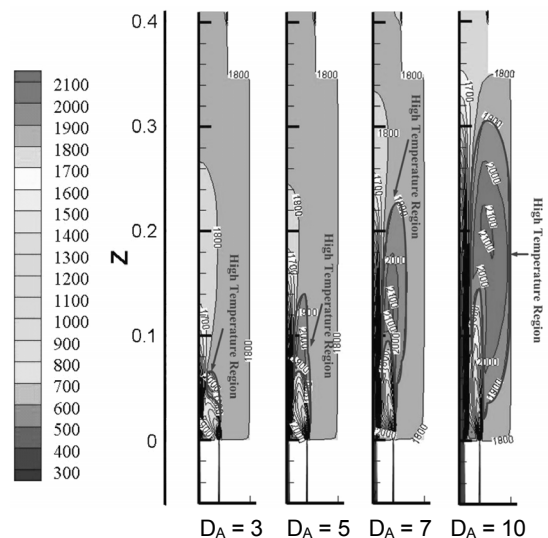


Fig. 7. Effect of air nozzle diameter on temperature contour in the XY plane at Case 1.

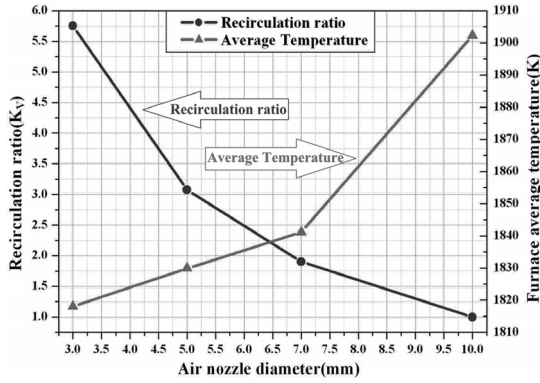


Fig. 8. Average temperature and recirculation ratio at different air nozzle diameter at Case 1.

적 온도가 일정하게 형성되는 것을 확인하였다. 위와 같은 온도분포의 특징을 가지는 산화제 노즐의 직경 변화에서 연소로 내부의 평균온도와 재순환율을 나타낸 Fig. 8을 확인한 결과 높은 화염온도영역이 작고 균일한 온도분포를 보인 산화제 노즐직경 3 mm에서 1,817 K의 가장 낮은 평균온도를 보였다.

이러한 산화제노즐의 직경이 작아짐에 따라서 평균온도가 감소하는 경향을 분석하기 위하여 식 (1)을 사용한 산화제노즐의 직경변화에 따른 재순환율을 확인하였다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 산화제노즐의 직경이 작아짐에 따라 유속이 증가하면 재순환율이 급격히 증가됨을 보았다. 산화제 직경이 작아짐에 따라서 재순환율이 증가하는 주된 원인은 산화제의 속도가 증가함에 따라서 주위 연소장에서 유입(Entrainment)되는 배기가스가 많아져 재순환되는 배기가스의 증가로 나타나는 현상으로 판단된다. 이와 같은 높은 재순환율은 재순환되는 고온의 배기가스의 증가를 가져와 점화지연시간의 감소 및 연소장 내에 반응물의 자연발화온도 이상의 온도장을 형성하여 반응영역이 넓어져 공간적으로 확장된 연소영역을 가진 볼륨연소를 가능하게 한다고 판단된다.

재순환율과 더불어 무염화염형성에 영향을 미치는 유입길이의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 9에 산화제직경에 따른 유입길이를 나타내었다. 이러한 유입길이를 나타내는 식 (3)을 사용한 이론값과 X축에서 Z축 방향으로 속도가 1개의 최고점을 갖는 Z축 최고 높이의 수치해석 결과 값과 거의 일치하고 있는 것을 확인하고, 산화제 유속이 증가하는 경우 유입길이가 짧아지는 경향을 보였다. 짧아진 유입길이 인하여 산화제와 연료의 혼합효과는 증가하여 고온 반응영역이 연소장 하단에서 일어나므로 높은 화염온도영역이 연소장 하단으로 집중되는 경향을 보인다. 따라서 산화제노즐의 직경 3 mm에서 가장 높은 재순환율과 유입길이의 영향으로 연소장 내부의 균

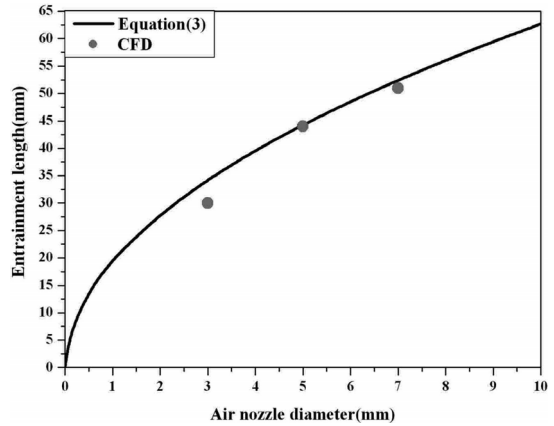


Fig. 9. Influences of air nozzle diameter on entrainment length at Case 1.

일한 반응영역을 통하여 낮은 평균온도와 고온 온도분포를 형성하여 무염화염 특징에 적합하다고 생각된다.

3.2. 연료노즐 직경변경에 따른 영향

산화제노즐 직경은 3 mm, 노즐간거리를 20 mm로 고정하여 연료노즐의 직경변화에 따른 연료유속변화가 무염화염형성이 미치는 영향을 분석하기 위하여 수치해석을 진행하였다. 온도분포를 확인하고자 Fig. 10에 연료노즐 중심에서 Z축 방향으로 높이 변화에 따른 온도변화를 나타내었다. Fig. 10을 살펴보면 모든 연료 노즐직경 변화에서 1,800 K 이상의 높은 화염온도영역이 좁게 나타나며 반응 후 일정 온도 영역이 넓게 유지됨을 확인할 수 있다. 또한 연료 노즐직경 4 mm에서 반응영역의 최고 화염온도와 반응 후의 유지되는 온도가 낮아진다. 그러나 연료노즐의 직경을 변경하여도 온도분포에는 큰 차이가 없

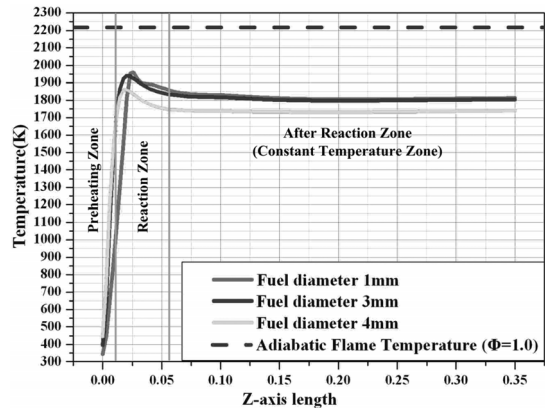


Fig. 10. Comparison of after temperature profile at the fuel nozzle center line by different fuel nozzle diameter at Case 2.

다. 따라서 연소장의 온도분포는 산화제의 분사조건에 큰 영향을 받으므로 연료노즐의 직경을 변화하는 경우는 무염화염 형성에 큰 영향이 없다고 판단하였다.

3.3. 노즐간의 간격변경에 따른 영향

무염화염특성에 연료가 산화제로 유입되는 유입길이(Entrainment length)가 미치는 영향 알아보기 위하여 산화제 및 연료노즐의 직경을 고정한 상태에서 노즐간의 간격을 변화하여 영향을 살펴보았다. 산화제 및 연료노즐의 직경변화가 무염화염형성에 미치는 수치해석결과에서 무염화염조건을 가장 잘 나타내는 산화제노즐 및 연료노즐의 직경인 3 mm와 1 mm의 조건에서 노즐간의 거리의 변화의 영향을 분석하기 위하여 노즐간의 거리를 10, 20, 30 mm로 변경하여 수치해석을 진행하였다.

Fig. 11은 노즐간의 간격변화에 따라 연소장으로 공급되는 연료의 분포도이다. 노즐간의 간격이 30 mm에서 10 mm로 가까워지는 경우 중앙의 산화제로 유입되는 속도가 빨라짐에 따라 유입길이가 짧아지는 경향을 연료의 분포도에서도 확연히 나타난다.

Fig. 12는 X축에서의 Z축 속도를 높이에 따라 나타낸 그래프로 Z축의 속도가 2개의 최고점이 존재하다가 1개의 최고점만이 존재하는 영역이 나타난다. 이중 1개의 최고점만이 생기는 최저 높이를 유입길이라 하고 노즐간거리 10 mm, 20 mm, 30 mm에서 각각 유입길이가 14 mm, 30 mm, 51 mm로 증가됨을 확인할 수 있었다. 또한 Table 2를 살펴보면 노즐간거리가 10 mm에서 30 mm로 증가하게 되면 재순환율도 증가되었다. 하지만 평균온도의 경우 노즐간거리 20 mm조건에서 가장 높게 발생하고 10 mm와 30

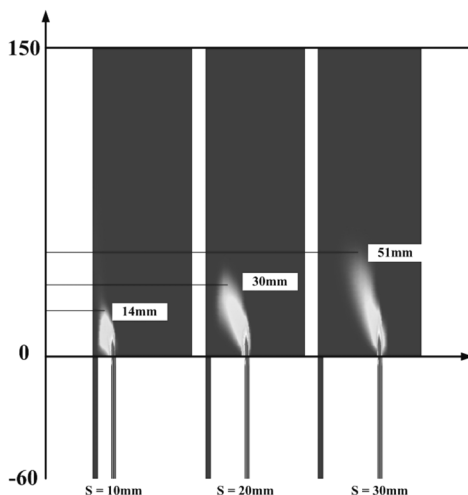


Fig. 11. Comparison of fuel contour at different between nozzles distance.

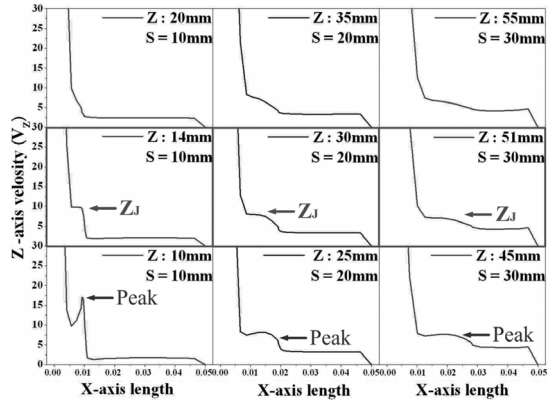


Fig. 12. Comparison of entrainment length at different between nozzles distance.

Table 2. Comparison of T_{Ave} and K_V : Case 3

	$S = 10 \text{ mm}$	$S = 20 \text{ mm}$	$S = 30 \text{ mm}$
$T_{Ave} \text{ (K)}$	1,728.3	1,817.9	1,754.1
K_V	5.37	5.75	6.69

mm에서는 20 mm에 비하여 낮게 발생됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 동일 연료 및 산화제 유속 조건에서 노즐간거리가 변함에 따라서 유입길이가 노즐간거리 10 mm 조건에서는 짧아져 혼합효과가 증가하고, 30 mm 조건에서는 희석효과가 증가하여 발생하는 현상이라 판단하였다. 희석효과와 증가는 배기가스와 공급되는 연료 및 산화제의 희석양이 증가되고 반응성이 감소되어 평균온도를 감소시킨다. 연료 및 산화제의 혼합효과와 증가는 연소반응이 보다 원활하게 발생하여 생성되는 기연가스의 팽창력이 향상되어 평균온도가 감소된다고 판단된다. 따라서 무염화염형성에는 재순환율과 더불어 유입길이에 따른 혼합효과와 희석효과를 각각 극대화 할 수 방향으로 노즐간격이 결정되어야 함을 알 수 있다.

3.4. 당량비 변화에 따른 영향

공급되는 산화제의 유량의 변화 즉 당량비의 변화가 무염화염에 미치는 영향을 분석하고자 앞선 수치해석의 결과에서 무염화염에 가장 적합하다고 판단하였던 산화제노즐직경 3 mm, 연료노즐직경 1 mm, 노즐간거리를 30 mm를 고정하여 분석하였다. Table 3은 당량비의 변화에 따른 재순환율 및 평균온도를

Table 3. Comparison of T_{Ave} and K_V : Case 4

	$\phi = 0.6$	$\phi = 0.7$	$\phi = 0.8$
$T_{Ave} \text{ (K)}$	1699.5	1754.1	1802.3
K_V	6.91	6.69	6.50

비교한 결과이다. 당량비가 0.8에서 0.6으로 작아짐에 따라 재순환율은 증가하게 되고 평균온도 또한 낮아진다. 당량비 0.6에서 평균온도가 감소하는 이유는 높은 재순환율에 의한 영향과 더불어 당량비가 낮아짐에 따라 단열화염온도가 감소하기 때문에 평균온도가 감소하는 일반적인 경향성을 따라간다고 할 수 있다.

3.5. 배기가스 배출 분석

본 연구에 적용된 공기노즐변화, 연료노즐변화, 노즐간의 간격변화, 당량비 변화와 같은 모든 작동조건에서의 NOx의 배출량을 Fig. 13에 비교 분석하였다. 재순환율의 영향과 유입길이에 따른 혼합효과와 희석효과의 영향으로 NOx 형성에 결정적 영향을 미

치는 연소장의 평균온도가 감소하면 NOx의 배출은 이와 비례하여 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 산화제노즐직경 7 mm, 10 mm을 제외한 모든 작동조건에서 2015년 국내 NOx 배출허용기준인 80 ppm보다 낮은 NOx가 발생하므로 배출규제를 만족한다.

3.6. 무염화염의 안정성검토

Wünnig이 재순환율과 평균온도에 관하여 제시한 무염화염 형성영역에 대하여 본 수치해석연구에 사용된 가동조건에서의 무염화염의 형성여부를 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14를 살펴보면 낮은 재순환율이 발생하는 영역으로 확산화염이 발생하는 ㉠영역, ㉡는 연소화염이 불안정하여 결국 연소화염이 소멸

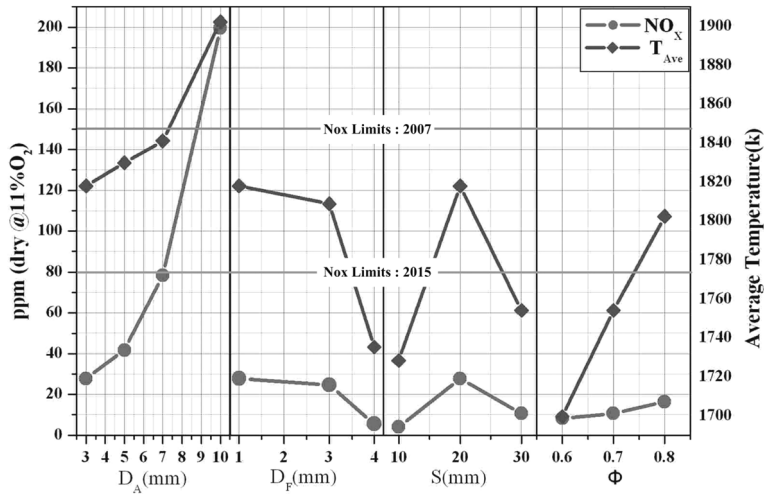


Fig. 13. Comparison of NOx emission at different injection condition and equivalence ratio.

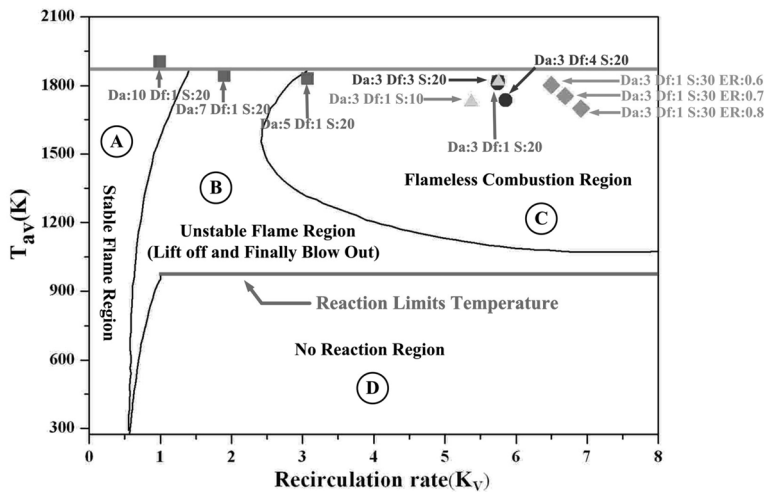


Fig. 14. Average temperature against K_v the corresponding schematic diagram of stability limits of flameless combustion.

되는 영역, ©는 재순환율과 평균온도의 영향에 의한 무염화염의 형성영역으로 Wüning은 정의하였다. Fig. 14에 수치해석결과를 비교한 결과를 살펴보면 Fig. 8에서 확인한 산화제 노즐직경 7 mm, 10 mm의 조건에서 높은 평균온도와 재순환율이 3 이하로 확인되어 Wüning이 제시한 무염화염영역을 만족하지 못하였다. 하지만 이 조건을 제외한 모든 수치해석 조건에서는 평균온도 범위가 1,070-1,873 K 영역에서 존재하고 재순환율이 3 이상으로 발생하여 Wüning이 제시한 무염화염영역을 만족하였다.

그러나 무염화염버너의 설계과정에는 재순환율만이 아니라 유입길이 변화에 따라 발생하는 혼합효과 및 희석효과 또한 평균온도와 배기가스 배출에 대한 영향에 대하여 큰 영향을 미치므로 Wüning이 제시한 무염화염형성영역과 같이 유입길이에 대한 고찰도 고려되어야 할 매우 중요한 설계 인자임을 확인하였다.

4. 결론

분사조건변화가 무염화염형성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 3차원 수치해석을 진행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 산화제노즐의 직경을 감소하여 공급되는 산화제의 유속을 증가하면 재순환율이 증가되어 고온영역과 평균온도가 감소됨을 확인하였다. 그러나 연료노즐의 직경변화는 무염화염 형성에 큰 영향이 없다고 판단하였다.

2) 노즐간의 거리변화의 영향을 분석한 결과 유입길이가 짧은 경우 혼합효과, 유입길이가 길어지는 경우 희석효과가 재순환율과 더불어 무염화염의 형성에 큰 영향이 있음을 확인하였다.

3) 당량비변화에 따라 공급되는 산화제의 유량이 증가하면 재순환율이 증가하게 되고 단열화염의 온도가 낮아져 저온의 무염화염을 형성이 가능하다.

4) 배기가스 분석결과 재순환율과 유입길이의 영향으로 평균온도가 감소함에 따라 NOx배출 또한 감소함을 확인하였다.

5) Wüning이 제시한 무염화염영역과 수치해석결과를 비교를 통하여 무염화염버너의 설계과정에는 재순환율과 유입길이 변화에 따라 발생하는 혼합효과 및 희석효과에 대한 고찰도 함께 고려되어야 할 매우 중요한 설계 인자임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] C. S. Lee and J. Y. Jeon, "Activities on IEA/ EC-ERC Delegation of Korea", Journal of Korean Society of Combustion, 2012, Vol. 17, No. 4, pp. 1-4.
- [2] J. Li, W. Yang, W. Blasiak and A. Ponzio, "Volumetric combustion of biomass for CO₂ and NO_x reduction in coal-fired boilers", Fuel, 2012, Vol. 102, pp.624-633.
- [3] B. O. Yang and I. G. Lim, "Experimental Study on High Temperature Air Regenerative Combustion System", 1999, 19th KOSCO Symposium, pp. 189-200.
- [4] E. S. Cho, B. Danon, W. de Jong and D. J. E. M. Roekaerts, "Behavior of a 300 kWth regenerative multi-burner flameless oxidation furnace", Applied Energy, 2001, Vol. 88, pp. 4592-4959.
- [5] J. A. Wüning and J. G. Wüning, "FLAMELESS OXIDATION TO REDUCE THERMAL NO-FORMATION", Progress in Energy and Combustion Science, 1997, Vol. 23, pp.81-94.
- [6] A. S. Verissimo, A. M. A. Rocha and M. Costa, "Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor", Experimental Thermal and fluid Science, 2013, Vol. 44, pp.75-81.
- [7] K. Arghode and K. Gupta, "Effect of flow field for colorless distributed combustion(CDC) for gas turbine combustion", Applied Energy, 2010, Vol. 87, pp. 1631-1640.
- [8] K. Arghode and K. Gupta, "Investigation of forward flow distributed combustion for gas turbine application", Applied Energy, 2011. Vol. 88, pp. 29-40.
- [9] K. Arghode and K. Gupta, "Investigation of reverse flow distributed combustion for gas turbine application", Applied Energy, 2011, Vol. 88, pp. 1096-1104.
- [10] G. G. Szegö, B. B. Dally and G. J. Nathan, "Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system", Combustion and Flame, 2009, Vol. 156, pp. 429-438.
- [11] J. Mi, P. Li and C. Zheng, "Impact of injection conditions on flame characteristics from a parallel multi-jet burner", Energy, 2011, Vol. 36, pp. 6583-6595.
- [12] E. Khalil and K. Gupta, "Swirling distributed com-

- bustion for clean energy conversion in gas turbine applications”, *Applied Energy*, 2011, Vol. 88, pp. 3685-3693.
- [13] E. W. Grandmaison, I. Yimer, H. A. Becker and A. Sobiesiak, “The Strong-Jet/Weak-Jet Problem and Aerodynamic Modeling of the CGRI Burner”, *Combustion and Flame*, 1998, Vol. 114, pp. 381-396.
- [14] B. E. Launder and D. B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974, Vol. 3, pp. 269-289.

논문접수일 : 2013. 03. 29
심사완료일 : 2013. 05. 04