Clean Technol., Vol. 26, No. 3, September 2020, pp. 211-220

청정에너지기술

80 kW 초 저 NOx 단일 버너 연소로에서 NOx 감소를 위한 운전특성 연구

채태영*

한국생산기술연구원 청정에너지시스템연구부문
31056 충남 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

(2020년 7월 16일 접수; 2020년 8월 4일 수정본 접수; 2020년 8월 4일 채택)

Study on Operating Characteristics for NOx Reduction in Ultra Low NOx Burner Combustion Using 80 kW Furnace

Taeyoung Chae*

Clean Energy System Research Division Korea Institute of Industrial Technology
89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 31056 Republic of Korea

(Received for review July 16, 2020; Revision received August 4, 2020; Accepted August 4, 2020)

요 약

본 연구는 80 kW급 단일버너 연소로에서 석탄 연소시 초저 NOx 버너 설계인자를 평가하기 위한 실험적 연구이다. 버너 설계인자인 선회강도, 총 과잉 공기비, 버너 영역 과잉공기비, 1차/2차 산화제 비율, OFA 비율을 변경하여 총 81개 조건을 대상으로 실험을 수행 하였다. 실험 결과, 선회류가 약하면 연소로 출구에서 CO가 증가하고 연소로 내부 온도가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 선회류가 강하면 NOx가 증가하기 때문에 적절한 선회류 강도를 결정하는 것은 NOx를 줄이는 데 중요한 요소이다. 1차/2차 산화제의 비율 또한 중요한 요소이며, 생성 된 NOx의 양은 산화제의 비율에 따라 달라진다. 2차 산화제의 비율이 증가하면 연소 초기에 NOx 방출량이 증가하고, 측정 된 배출구 NOx가 증가하게 된다. 그러나, 2차 산화제 비율이 감소하면 화염이 길어지고 CO가 증가한다. 본 연구에 사용 된 연소 시스템은 적절한 조건이 만족 될 때 O_2 6%를 기준으로 최소 NOx가 82 ppm 생성되는 것으로 확인 되었다. 본 실험에서 대상으로 한 버너는 연소용 공기를 석탄을 이송하는 1차공기 외에 2차공기로 하나의 산화제 유동만 사용하는 방식으로서 추후 3차 및 4차공기로 분할하여 화염형태 및 반응을 세밀하게 제어할 경우 추가적인 NOx 감소가 가능할 것으로 예상된다.

주제어 : 석탄, 연소, NOx 생성량, 선회류 수, 과잉공기비

Abstract : This experimental study investigates the design parameters to achieve ultra low NOx combustion of coal using a 80 kW capacity single-burner furnace. The influence of key design parameters such as SN, overall and burner-zone equivalence ratios, primary/secondary air ratio, overfire air (OFA) ratio were tested for a total of 81 cases. The results showed that weak swirl intensity of the burner leads to higher NOx emission whereas strong swirl intensity accompanies increased CO concentration desipte lower NOx emission. Therefore, finding an appropirate swirl intensity is essential for the burner design. Larger flow rate of secondary air increased NOx emission, whereas smaller flow rate stretches the flame and increased CO emission. The lowest NOx emission of 82 ppm (6% O_2) was achieved at the optimal condition of the present burner deisgn. It is expected to furrther lower the NOx emission by introducing splitting the burner secondary air into three or four streams.

Keywords : Coal, Combustion, NOx emission, Swirl number, Equivalence air ratio

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hitae0@kitech.re.kr; Tel: +82-10-9150-5955; Fax: +82-32-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2020.26.3.211 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

앞으로 수십 년간 신재생 에너지의 지속적인 성장으로 인해 화석 연료의 비율이 감소하더라도 에너지 생산은 여전히 화석 연료에 크게 의존 할 것이다[1,2]. 석탄은 다른 화석 연료에 비해 저렴한 비용과 높은 가용성으로 인해 향후 수십 년 동안 주요 에너지원으로서 중요한 역할을 계속할 것으로 예상된다. 그러나 석탄 발전소의 경우 NOx 생산을 감소시키는 것이 중요한 문제이다. 현재 모든 석탄 화력 발전소는 선택적 촉매 환원 시스템(selective catalytic reduction: SCR)을 사용하여 NOx를 제거하지만 운영 및 유지 보수비용이 높은 단점이 있다[3-5]. SCR 시스템의 경우, 연소 후 설비에 암모니아를 투입하여 NOx를 제거하는 방법이지만 암모니아(NH_3)를 과도하게 첨가하면 암모니아 슬립(ammonia slip)으로 인한 문제가 발생한다. 연소 후 생성된 NOx와 정량적으로 반응하는 암모니아 양보다 많은 양의 암모니아를 주입하게 되면 반응에 참여하지 않은 암모니아가 배기가스 중으로 배출하는 현상을 암모니아 슬립 이라 한다. 암모니아의 경우에는 주입량이 증가하면 그만큼 NOx의 제거효율도 증가하지만 반응에 참여하지 않고 배출되는 암모니아는 그 자체가 주변 환경에 영향을 주기 때문에 적절한 양을 주입하여 반응에 참여하지 않고 배출되는 암모니아의 양을 최소화하여야 한다. 그러나 필요이상의 암모니아를 투입하게 되면 SCR이나 SCR 바로 아래에 있는 공기예열기 열소자에 점착되어 촉매나 열소자를 막아버리게 되고 이 현상이 지속되면 촉매가 점점 막히면서 촉매 상하부 사이 차압이 생기고 차압이 약한 부분으로 배기가스의 흐름이 집중되면서 마모가 일어나 구멍이 생기게 된다. 이러한 현상이 지속되면 SCR의 탈질효율도 떨어지게 되어 촉매를 교체하게 되기 때문에 정기적으로 높은 운영비용이 발생된다. NOx의 경우 인체에 유해 할 뿐만 아니라 최근에 미세먼지의 전구물질로 알려져 석탄 화력 발전소에서 제거해야 할 중요한 인자이다. 석탄 연소의 경우, SCR 시스템 이전에 평균 약 350 ppm의 NOx 방출이 측정되며, SCR 시스템의 출구에서 10 ppm으로 감소한다[3]. 그런데, 연소 후 NOx 방출을 약 50 ppm 이하로 감소시키면 사용되는 암모니아의 양이 감소하게 되고 암모니아 슬립에 대한 우려도 감소한다. 이 경우 암모니아가 촉매에 점착되는 영향도 감소하기 때문에 SCR 시스템의 비용이 절감 될 뿐만 아니라 환경 문제도 개선되므로 초 저 NOx 버너를 개발하는 것이 매우 중요한 과제이다. 현재, 초 저 NOx 버너의 개발은 버너를 발전소에 공급하는 회사에 의해 많은 연구가 수행되어 왔으며, 거의 한계에 도달한 실정이다. 현재 초 저 NOx 버너의 경우, NOx 배출양은 약 150 ppm이다. 또한, 많은 연구자들에 의해 산업용 연소로의 NOx 배출을 줄이기 위한 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. NOx 배출을 감소시키기 화염을 없애고 연소시키는 기술인 moderate and intense low oxygen dilution (MILD) 연소 방법[6,7]; 순산소를 사용하여 CO_2를 포집 할 수 있는 연소 방법[8-10]; 폐기물 바이오매스로부터 생성된 합성 가스의 연소 방법[11-13]; 바이오매스와 석탄의 동시 연소 인 혼소 방법[14-16] 등 다양한 연구가 진행 되었다. NOx는 산화질소(NO), 이산화질소(NO_2) 및 연소 중에 생성 된 미량의 다른 종류의 NOx를 의미한다. 화석 연료의 연소는 높은 온도에서 연소가 진행되기 때문에 과량의 NOx를 생성 시킨다. 연소 후 생성된 NOx 중 대부분 NO이며 90 ~ 95% 정도를 차지하고 대부분의 NO가 대기 중에서 NO_2로 산화된다. NOx는 thermal NOx, prompt NOx 및 fuel NOx로 구분 할 수 있다. 본 연구에서 석탄의 연소 온도는 최대 약 1200 ℃ 내외인 것을 볼 때 Figure 1에 나타난 바와 같이 약 75% 이상 fuel NOx이며 thermal NOx의 경우 25% 미만이고 prompt NOx는 5% 미만 생성되는 것을 볼 수 있다[17].

Thermal NOx는 연소 중 공기에 포함된 질소가 고온산화를 통해 생성되는 것으로 온도와 체류시간과 밀접한 관계에 있다. Thermal NOx는 일반적으로 온도가 증가함에 따라 증가하게 되고 온도가 상승 할수록 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 고온의 연소 공기는 질소(N_2)와 산소(O_2)를 원자 상태로 분리하여 재결합시키게 되기 때문이다. Thermal NOx를 생성 시키는 반응은 다음과 같다.

- Thermal NOx

$N_2 + O \leftrightarrow NO + N$ Equation (1)

$N + O_2 \leftrightarrow NO + O$ Equation (2)

$N + OH \leftrightarrow NO + H$ Equation (3)

연료 과잉 화염 영역에서 질소분자와 탄화수소는 N, CN 또는 HCN 형태로 빠르게 변환된 후 Equation (4 ~ 7)과 같이 산화되어 NOx가 된다. 이렇게 생성된 질소산화물을 Prompt NOx라 부른다. Prompt NOx는 화염내부 에서 생성되며, 연료의 연소과정과 밀접한 관계가 있다. 또한, Thermal NOx에 비하여 상대적으로 낮은 온도, 연료에 비하여 공기가 부족한 상태, 그리고 연소에 걸리는 시간이 비교적 짧은 조건하에서 상대적으로 많이 생성된다. Prompt NOx는 thermal NOx에 비하여 생성량이 극히 미약하므로 전체 NOx 량이 매우 적을 때를 제외하고는 무시하여도 좋다.

- Prompt NOx

$CH \cdot + N_2 \leftrightarrow HCN + N \cdot$ Equation (4)

$2C + N_2 \leftrightarrow 2CN$ Equation (5)

$HCN + O \leftrightarrow NO + CH$ Equation (6)

$2CN + O \leftrightarrow NO\ 2C$ Equation (7)

Fuel NOx는 750 ℃보다 높은 온도에서 석탄에 유기결합 된 질소화합물의 산화로 생성된다. 연료에 포함된 질소는 NOx 환원 기술의 적합 여부와 석탄의 특성에 따라 석탄 연소 중 발생된 총 NO 생성량의 75% 이상, 때로는 95% 이상을 차지할 때도 있다. 전통적인 완전 연소(고온, 긴 체류 시간 및 공기와 연료의 빠른 혼합)는 fuel NOx와 thermal NOx를 증가시키는 경향이 있다. 따라서 효과적인 연소 제어로 NOx 형성을 억제 시키는 것이 필요하다. Fuel NOx를 감소시키기 위한 가장 중요한 것은 연료 과잉 영역(fuel rich zone)과 연료 희박 영역(fuel lean zone)을 정확하게 구분하여 안정적으로 연소시킬 수 있는

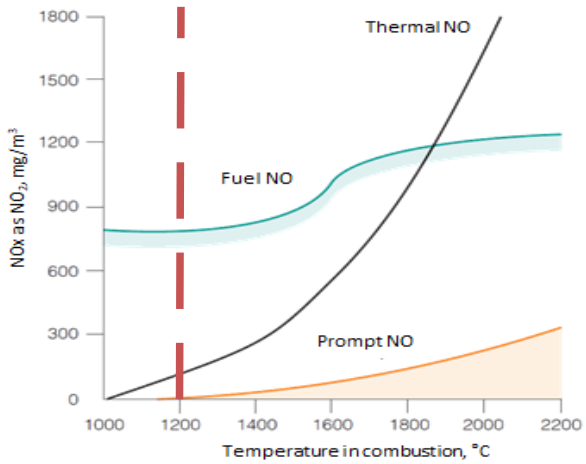


Figure 1. Temperature influence on the amount of NOx produced from the three NOx formation mechanisms in coal combustion [18].

버너를 개발 하는 것이다. Fuel NOx 생성을 억제하기 위해 버너를 개발하게 되면 thermal NOx 역시 감소시킬 수 있기 때문에 추가로 NOx 생성을 억제 시킬 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구는 위의 반응으로 생성되는 NOx를 다양한 조건 변경을 통해 감소시킬 수 있는 방법을 알아보고자 하는 것이다.

2. 실험방법

2.1. 실험 장치

본 실험에서 사용된 장치는 80 kW 단일 버너 연소로로서 Figure 2에 개략도를 나타내었다. 내부 지름 600 mm, 높이 500 mm인 원통 형태의 연소로가 5단으로 이루어져 총 2500 mm의 연소로가 있으며, 연소로 벽면에는 프로브와 열전대 삽입을 위한 포트가 위치하고 있다. 각 단 연소로에는 연소로 벽면 온도 측정을 위한 R타입의 열전대가 2개씩 설치되어 있다. 연소로 후단에는 사이클론과 회분 집진기(bag filter)가 설치되어 연소 후 생성되는 회분을 포집 할 수 있도록 하였다. 사이클론의 경우, 실시간으로 회분을 포집 할 수 있도록 설계되어 있다. 그림에는 생략되어 있으나, 연소로 상단에는 무게측정이 가능하도록 loadcell이 장착된 피더(feeder)가 설치되어있다.

석탄 버너는 Figure 3 표시 된 바와 같이 제작되었다. 2차 산화제의 균일 한 흐름을 위해 버너 내부에 타공판을 설치하였고 선회류를 생성시키기 위해 내부에 접선 vane을 설치하였다. Vane은 쉽게 탈착이 가능하고 선회류 강도를 조절 할 수 있도록 설계되었다. 연료 및 산화제의 안정적인 혼합을 위해 버너 출구에 quarl을 45° 각도로 설치하였다. 버너의 선회류 수(swirl number; SN)는 다음 식에 의해 계산되었다.

$$S' = \frac{1}{1-\frac{zs}{2\pi R_1 \cos\alpha}} \frac{\tan\alpha^\circ}{1+\tan\alpha^\circ \tan\left(\frac{\pi}{z}\right)} \frac{R_4}{2B}\left[1-\left(\frac{R_3}{R_4}\right)^2\right] \quad \text{Equation (8)}$$

(α: angle of swirl, z: number of vane, s: thickness of vane, B: thickness of swirl zone, R1, R2, R3, R4: radius of pipes)

2.2. 실험 조건

Table 1은 석탄 조성을 나타낸 것이다. 일반적으로 화력발전소에서 사용 중인 아역청탄(adaro)을 사용하였다. 조건 변경 실험이기 때문에 1종의 석탄으로 실험을 진행 하였다.

본 실험은 2단계로 진행 되었다. 1차로 81개의 시험 조건으로 진행하고 그중 중요하게 생각되는 조건을 선택하여 2차 실

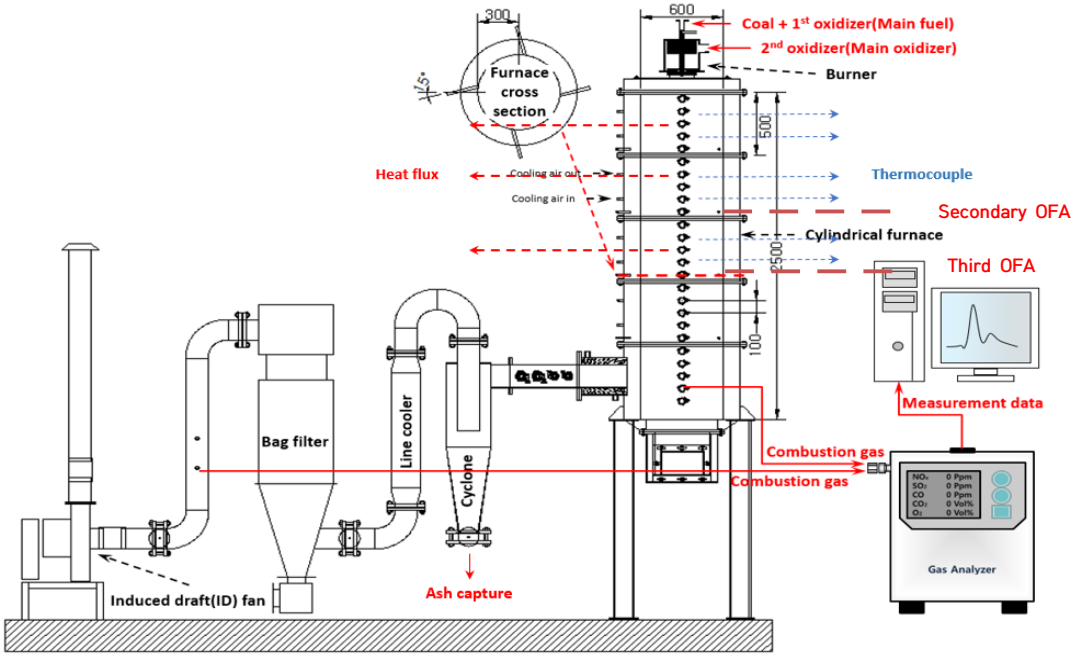


Figure 2. Schematic diagram of the experimental set-up.

Table 1. Composition of the fuels

Fuel	Component	Proximate analysis (%wet)				Ultimate analysis (%wet)					LHV (MJ kg^{-1})
		M	VM	FC	Ash	C	H	O	N	S	
Coal	Adaro	14.5	42.8	40.9	1.8	66.3	5.2	11.2	0.9	0.1	26.6

Table 2. 1st experimental conditions

OFA off	Case #	EAR	1st/2nd ratio
BZ EAR 1.2	1 (1119)	1.1	1 : 9
	2 (1128)	1.1	2 : 8
	3 (1137)	1.1	3 : 7
	4 (1219)	1.2	1 : 9
	5 (1228)	1.2	2 : 8
	6 (1237)	1.2	3 : 7
	7 (1319)	1.3	1 : 9
	8 (1328)	1.3	2 : 8
	9 (1337)	1.3	3 : 7

OFA 2nd stage	Case #	EAR	1st/2nd ratio
BZ EAR 0.9	10 (20912)	1.2	2 : 8
	11 (20913)	1.3	2 : 8
	12 (20914)	1.4	2 : 8
BZ EAR 1.0	13 (21012)	1.2	2 : 8
	14 (21013)	1.3	2 : 8
	15 (21014)	1.4	2 : 8
BZ EAR 1.1	16 (21112)	1.2	2 : 8
	17 (21113)	1.3	2 : 8
	18 (21114)	1.4	2 : 8

OFA 3rd stage	Case #	EAR	1st/2nd ratio
BZ EAR 0.9	19 (31012)	1.2	2 : 8
	20 (30913)	1.3	2 : 8
	21 (30914)	1.4	2 : 8
BZ EAR 1.0	22 (31012)	1.2	2 : 8
	23 (31013)	1.3	2 : 8
	24 (31014)	1.4	2 : 8
BZ EAR 1.1	25 (31112)	1.2	2 : 8
	26 (31113)	1.3	2 : 8
	27 (31114)	1.4	2 : 8

* BZ: Burner zone, EAR: Equivalence air ratio

험을 진행 하였다.

Table 2는 1차 실험 조건을 나타낸 것이다. 총 81개 경우에 따라 실험을 진행 하였고 실험 조건은 크게 5가지로 구분할 수 있다. 스월 넘버(swirl number), 버너영역 과잉공기비(equivalence air ratio; EAR), over fire air (OFA) 투입 위치, 버너의 1/2차 산화제 비율, 총 당량비 이다. Swirl number 총 3가지를 결정하여 진행 하였고 각 swirl number당 27 case 실험을 진행하였다. 스월 넘버는 버너에 설치된 vane이 각도를 조절하여 선회류를 형성 시킬 때 그 강도에 따른 수로서 수가 클수록 강한 선회류가 형성된다. 과잉공기비는 투입되는 연료의 당량비보다 많은 양의 공기가 투입되는 것을 말하며 예를 들어 EAR 1.0의 경우, 연료 1에 필요한 공기(O_2)가 1 투입된다는 의미이고 이보다 클 때 공기가 과잉으로 투입된다는 것을 뜻한다. Table 2는 1가지 swirl number의 실험 조건을 나타낸 것으

Table 3. 2nd experimental conditions (swirl number 0.84, 0.98)

No OFA	Case #	Case name	SR	1st/2nd ratio
BZ EAR	2	1128	1.1	2 : 8
	5	1228	1.2	2 : 8
OFA 2nd	Case #	Case name	SR	1st/2nd ratio
BZ EAR 0.9	10	20912	1.2	2 : 8
	11	20913	1.3	2 : 8
BZ EAR 1.0	13	21012	1.2	2 : 8
	14	21013	1.3	2 : 8
OFA 3rd	Case #	Case name	SR	1st/2nd ratio
BZ EAR 0.9	19	30912	1.2	2 : 8
	20	30913	1.3	2 : 8
BZ EAR 1.0	22	31012	1.2	2 : 8
	23	31013	1.3	2 : 8

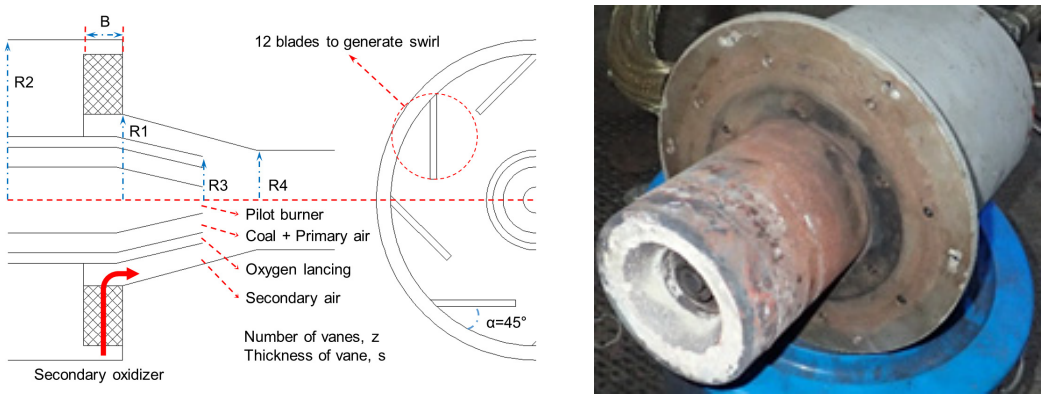


Figure 3. Schematic diagram of 80 kW coal burner and picture.

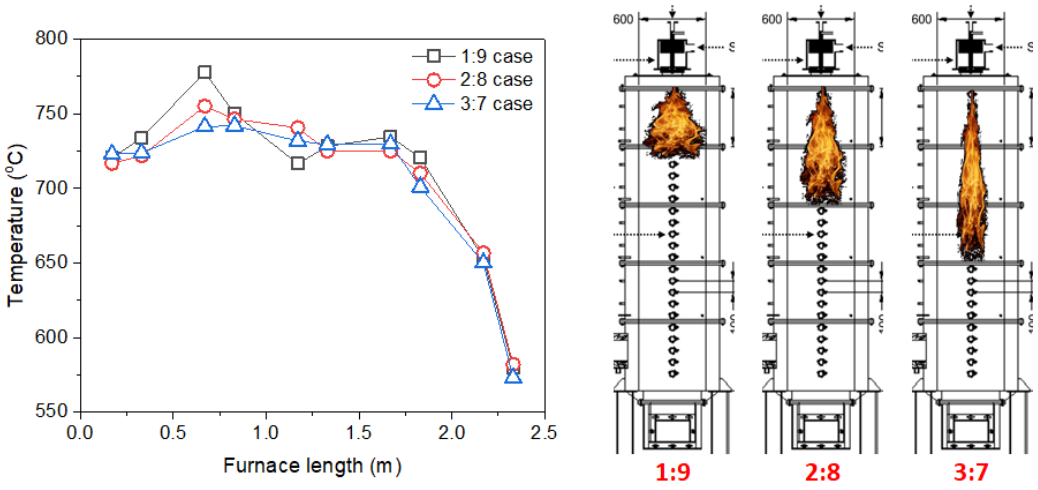
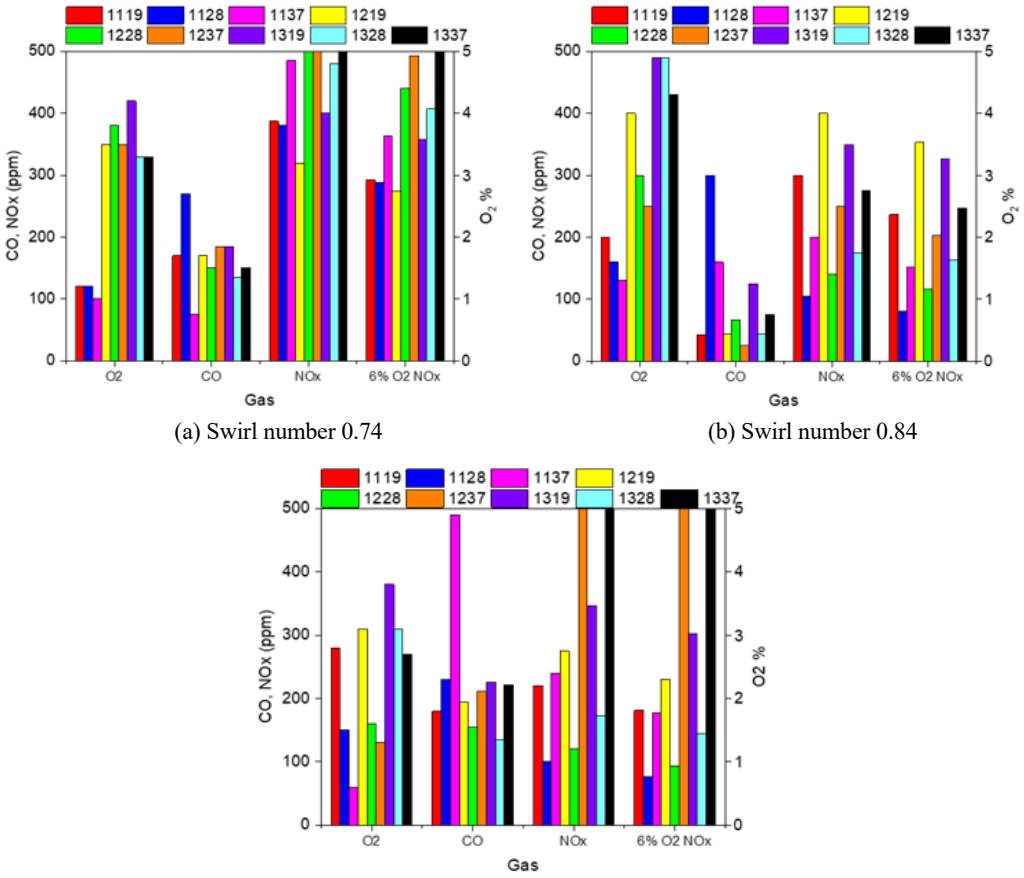


Figure 4. Wall temperature distribution and expected flame according to oxidizer ratio.

로 swirl number 변경에 따른 실험 조건은 동일하기 때문에 1가지만 표로 나타내었다. 실험 조건 별 버너영역의 EAR (0.9 ~ 1.3) 변화에 따라 나머지 공기를(0.4 ~ 0) OFA로 투입 하였다. OFA는 Figure 2와 같이 연소로 2단 하부와 3단 하부에서 투입 하였다. 실험 조건의 숫자 뒤( ) 표시는 실험 조건을 결과에서 보기 편하게 적은 것이다. Table 2에 나타난 바와 같이 OFA는 on/off로 표시 하였고 투입 위치는 2nd, 3rd로 표시 하였다.

다음 Table 3은 1차 실험을 토대로 오류를 보완하여 재 실험 한 조건을 나타낸 것이다. 위 실험에서 SN 0.74의 경우, 안정적 연소현상이 나타나지 않아 제외하고 SN 0.84, 0.98의 경우만



(a) Swirl number 0.74

(b) Swirl number 0.84

(c) Swirl number 0.98

Figure 5. Effects of various cases on NOx, CO and O_2 emission (Condition: SN, $1^{st}/2^{nd}$ oxidizer, Total EAR).

고려하여 실험 조건을 설정하였다. 실험은 SN 별 10 case로 총 20 case를 진행 하였다. 실험에서 고려된 사항은 OFA의 유무, O_2 농도이다. 또한, 1차 실험 후 중요하다고 생각되었던 조건들만 정리하여 실험을 진행 하였다. 결과의 비교를 위해서 실험 조건명은 1차 실험과 동일하게 하였다. 우선 OFA가 없는 조건의 경우, 1, 2차 산화제 비율을 2 : 8만 고려하고 total EAR 1.3까지 결정하였다. 버너 영역의 EAR은 1.0까지로 결정하였다.

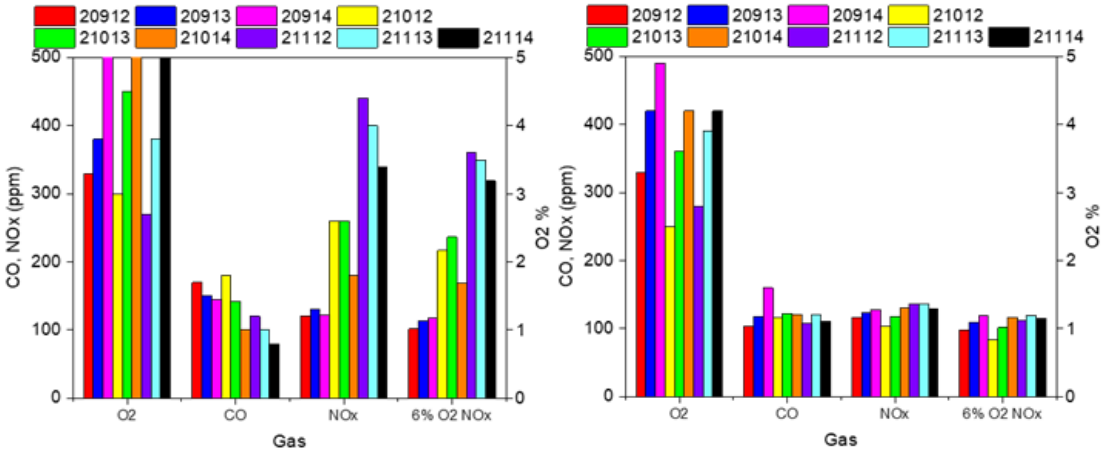
3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 분포

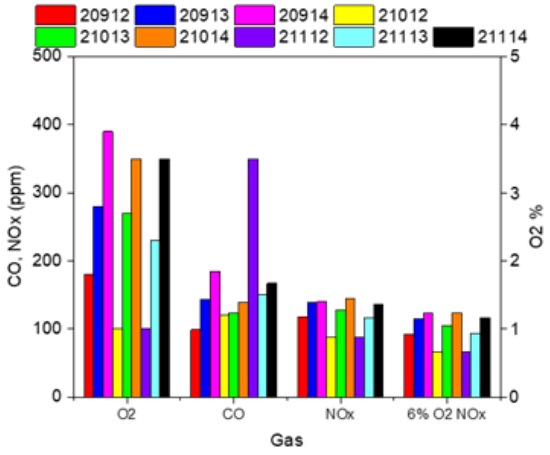
다음 Figure 4는 연소로 벽면의 온도를 나타낸 것이다. 연소로 중앙의 온도는 기초 실험에서 열전대(thermocouple, TC)를 연소로 중앙까지 설치하여 측정하였으나 본 실험에서는 유동에 영향을 미치기 때문에 측정하지 않고 벽면 온도만 특정 하였다. 연소로 중앙 최대 온도는 case 1 기준 최대 1300 ℃까지 측정 되었다. 온도 분포의 변화는 1, 2차 산화제의 비율에 따라 총 3가지로 나타난다. 다음은 그 평균값을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 1차 산화제 비율이 감소할수록 고온부가 버너쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 일반적인 결과로서 2차 산화제의 양이 증가하여 선회류가 강하게 생성되고 1차 산화제의 양이 감소하여 1차 유속이 감소하기 때문이다. 우측 그림은 화염 형상을 온도 기반으로 예측한 것이다. 일반적으로 화염이 짧을수록 연소가 안정적이고 재순환영역의 형성으로 NOx가 감소하게 된다. 그림과 같은 경우라면 1 : 9가 가장 안정적일 수 있지만, 2 : 8 또한 유사한 경우이기 때문에 연소 후 가스 조성 측정 후 정확한 예상이 가능하다.

3.2. 1차 실험 연소가스 측정 결과

다음 Figure 5, 6, 7은 조건 별 연소가스 측정결과이다. 결과는 스월 넘버 별로 구분하여 정리하였고, O_2, CO, NOx, O_2 6% 보정된 NOx 측정 결과를 정리한 것이다. 다음 3개의 Figure 5는 실험 조건 1 ~ 9까지 결과를 정리한 것으로 1, 2차 유량비와 전체 EAR 값을 변경하여 실험한 결과이다. 일반적으로 안정적인 연소일 때, CO의 측정값은 100 ppm 이하에서 형성된다. 그러므로 실험 결과 중 CO농도 100 ppm 이하의 결과를 바탕으로 서술하도록 하겠다. 실험 결과를 살펴보면, SN 0.98에서 CO가 평균적으로 높게 측정된 것을 볼 수 있다. 출구 O_2가 상대적으로 낮게 측정되기 때문에 나타난 결과이다. 본 실험의 경우, 여러 조건을 측정하였기 때문에 유량계에 측정된 유량을 신뢰하여 배기가스에서 측정된 O_2농도가 계산값과 다르더라도 이를 보정하지 않고 측정하였다. 현재 유량계의 경우, air preheater 전단에 설치되어 측정되는 것으로 SN가 증가하여 압력 손실이 생길 경우 실제 유량은 감소 할 수 있다. 유량계의



(a) Swirl number 0.74 (b) Swirl number 0.84



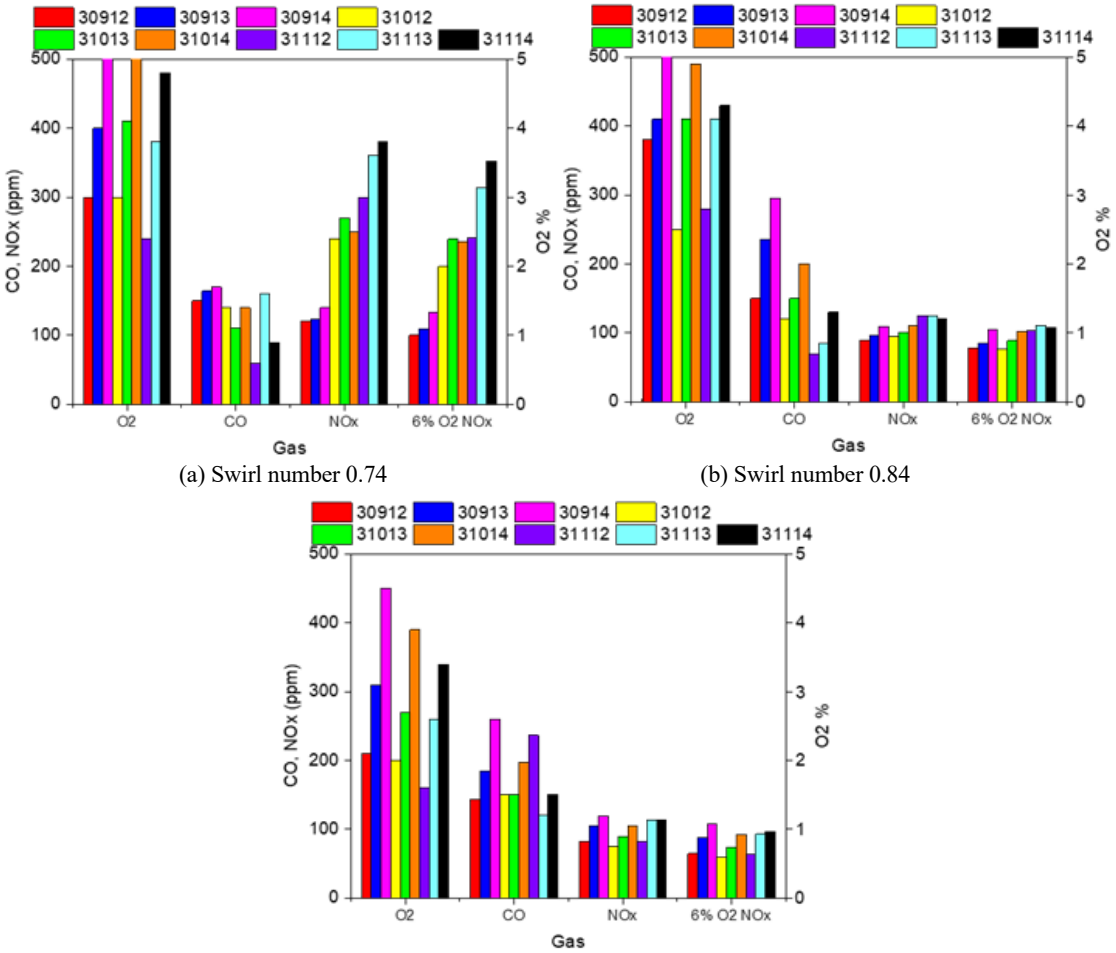
(c) Swirl number 0.98

Figure 6. Effects of various cases on NOx, CO and O_2 emission (Condition: OFA 2nd stage, Burner EAR, Total EAR).

손실량을 고려하더라도 1 : 2차 비율 2 : 8의 경우, NOx와 CO가 동시에 낮게 측정 된 것을 볼 수 있다. EAR 1.1의 경우는 O_2의 양이 충분하지 못하기 때문에 SN에 관계없이 CO가 높게 측정 되었다.

다음 Figure 6은 1, 2차 유량비를 2 : 8로 고정 후 버너 영역의 EAR과 전체 EAR을 변경시키고 OFA를 연소로 2단에 투입하여 실험한 결과이다. 앞의 결과와 마찬가지로 SN 0.98의 경우, O_2 측정 결과가 낮은 것을 볼 수 있다. 전체적으로 볼 때 SN 0.98에서 21012 case의 NOx가 66 ppm으로 가장 낮지만 CO가 120 ppm으로 100 ppm을 넘어 불완전 연소의 형태를 나타내고 있다. 그러나 SN 0.84의 경우, 전체적으로 CO의 농도가 낮고 NOx 측정값도 100 ppm 전후로 형성 된 것을 볼 수 있는데, SN가 0.98로 매우 강 할 때보다 안정적인 연소 형태를 보이는 결과라고 볼 수 있다. 싱글 버너 연소에 있어서 선회류가 너무 강하게 되면 2차 공기가 연료와 혼합되기 전에 연소로 벽면을 치고 흐르기 때문에 fuel lean 영역과 fuel rich 영역의 형성에는 도움이 되지만 안정적인 연소에는 부정적인 영향이 나타나게 된다. 그러므로 안정적인 연소를 고려해서 SN를 결정해야 할 필요가 있다. 본 연구에 사용 된 버너에서는 SN 0.84의 경우가 이에 해당된다고 볼 수 있다. SN 0.74의 경우 출구 O_2 농도가 높고 CO 또한 높은 것을 볼 수 있는데, 이것은 약한 선회류로 인해 연료와 산화제의 혼합 속도가 느려지게 되어 연소로를 통과하기 전에 연소가 완료되지 못하기 때문에 나타나는 현상이다.

Figure 7은 Figure 6과 같은 조건에서 OFA를 연소로 3단에 투입한 결과이다. 전체적으로 2단에 투입한 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. SN 0.98에서 31012 case를 보면 NOx는 2단에서 실험한 결과보다 낮은 59 ppm이 측정되었지만, CO는 150 ppm으로 더 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 전체적으로 볼 때 OFA를 투입하지 않은 경우보다 CO가 높게 형성된 것을 볼 수 있는데, 이것은 OFA가 연소 역할을 제대로 수행하지 못하였기 때문이다. 본 실험에 사용된 OFA는 상온의 공기가 투입 되었다. 투입 열량이 80 kW임을 감안 할 때 연소보다 냉각효과가 더 크기 때문에 나타나는 결과로 사료된다. 열량이 1 MW 이상으로 큰 설비에서는 냉각 공기가 투입되더라도 공기의 승온율이 높아 이러한 문제가 발생하지 않지만, 본 실험의 경우와 같이 열량이 상대적으로 낮은 연소로에서는 상온의 공기를 투입하는 것은 연소에 부정적인 영향이 있다고 판단된다. 본 실험 결과를 토대로 중요한 인자만 다시 설정하여 재 실험을 진행 하였다. 다음에 서술하는 내용은 위의 실험에서 나타난 결



(a) Swirl number 0.74 (b) Swirl number 0.84

(c) Swirl number 0.98

Figure 7. Effects of various cases on NOx, CO and O_2 emission (Condition: OFA 3rd stage, Burner EAR, Total EAR).

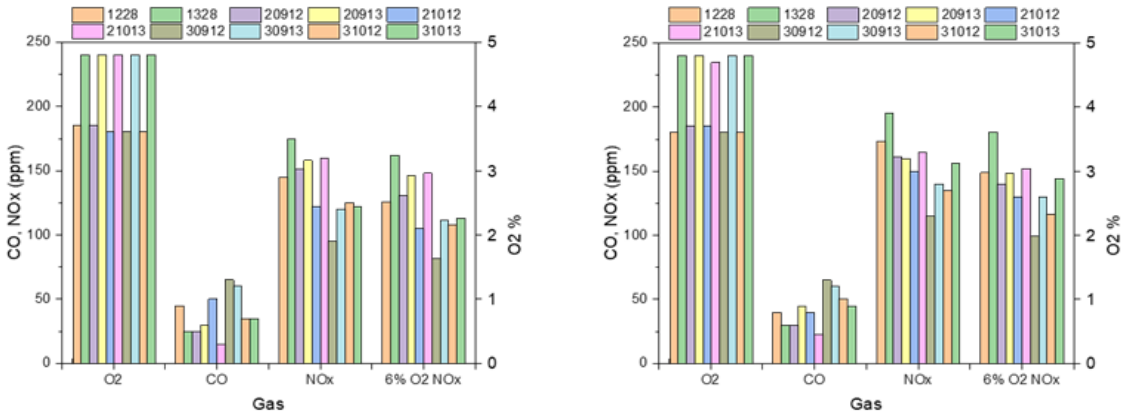
과 중 부족했던 부분을 고려하여 실험 조건을 재설정하여 실험을 진행 하였다.

3.3. 2차 실험 연소가스 측정 결과

본 실험에서 연소로 온도는 1차 실험과 유사하기 때문에 제외하고 측정된 연소가스 농도만 설명하도록 하겠다. 다음 Figure 8은 2차 실험 조건에 대한 연소가스 농도를 나타낸 것이다. 연소가스 농도는 EAR 1.2 3.6 ~ 3.7, EAR 1.3은 4.7 ~ 4.8%의 O_2 농도가 측정 되었다. 이때 CO농도는 25 ~ 65 ppm 정도로 매우 안정적인 연소를 나타내었다. 이때 NOx 농도를 살펴보면 O_2 6%로 환산했을 때, SN 0.84, OFA 3단 투입, 버너 영역 EAR 0.9, 전체 EAR 1.2에서 82 ppm을 나타내었다. OFA는 평균 350 ℃였고 O_2는 3.6%를 나타내었다. 매우 안정적인 연소에서 NOx도 100 ppm 이하의 값을 나타낸 것이다. 이것은 적절한 SN에서 연료 과잉 영역과 연료 희박 영역이 안정적으로 분리되어 NOx의 환원 영역을 형성시켜 NOx를 감소시킨 결과라고 볼 수 있다. 버너 영역의 EAR을 1.0으로 했을 경우, 상대적으로 안정적인 연소 형태에 가깝기 때문에 CO농도는 낮지만 NOx 농도는 높은 것을 볼 수 있고, OFA가 없는 경우에 비해 OFA를 투입하였을 때 NOx가 낮게 생성되는 것을 볼 수 있었다. 또한, OFA투입 위치가 3단일 경우 NOx가 낮게 생성되었다. 연소 후 충분한 환원 영역을 확보하는 것도 NOx 감소에 중요한 인자라고 볼 수 있다. 총 EAR의 경우, 필요이상을 투입하게 되면 NOx 생성을 증가 시키게 되므로 EAR 1.2 (±0.1)에서 결정하는 것이 바람직 할 것으로 사료 된다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 산화제를 최소 3단까지 투입하여 유선을 분리 투입하는 것이 NOx 감소에 효과적일 것이다. Figure 9는 NOx 생성량만 정리하여 mg/MJ로 표시한 결과이다. ppm 단위와 경향은 동일한 것을 볼 수 있다. 여기서 NOx 최소량은 SN 0.84, OFA 3단 투입, 버너영역 EAR 0.9, 전체 EAR 1.2에서 38.8 mg/MJ로 측정 되었다.

3.4. 연소 효율

Table 4는 연소 효율에 대해 나타낸 것이다. 연소 효율의 경우 2차 실험 후 포집한 ash를 분석 후 정리한 것이다. 포집은 SN에 따라 두 곳(Cyclone 하단, furnace bottom)에서 1번씩 총 4번 포집하였다. 분석 결과 0.84의 경우, 감량이 1.9, 6.6%이고 0.98의 경우, 2.2, 9.2%이다. 이것은 ash에 포함된 가연분의 % 이므로 ash를 기준으로 보면 본 연구에 사용된 석탄에 포함된 ash의 함량은 1.8%이기 때문에 실험 조건에 관계없이 최대



(a) Swirl number 0.84 (b) Swirl number 0.98

Figure 8. Effects of various cases on NOx, CO and O_2 emission (Condition: OFA on/off, Total EAR, Burner EAR).

Table 4. Result of unburned carbon

Swirl number	0.84	0.98
Bottom combustible content (%)	0.011	0.012
Cyclone combustible content (%)	0.037	0.051
Bottom combustion efficiency (%)	99.98	99.99
Cyclone combustion efficiency (%)	99.96	99.95

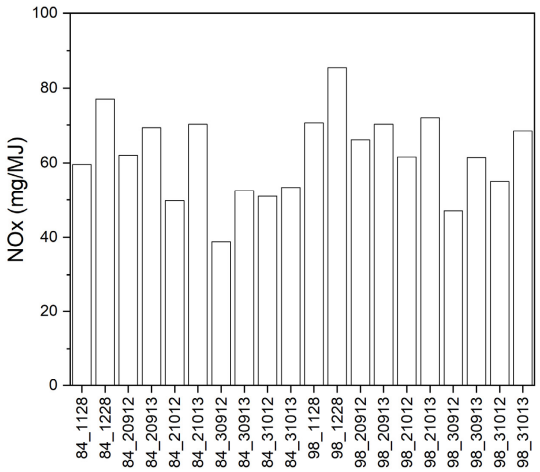


Figure 9. Effects of various cases on NOx emission (mg/MJ).

9.2%가 연소되지 않고 ash에 포함되었다는 것이다. 계산을 하면 모든 조건에서 표와 같이 연소 효율은 99% 이상으로 나타난다. 그러므로 모든 조건에서 안정적인 연소가 진행 되었다고 볼 수 있고 연소 효율에서는 본 연구에 사용된 버너와 연소로는 큰 문제가 없는 것으로 사료 된다.

4. 결 론

본 연구는 초 저 NOx 버너 설계 기술 개발을 위한 기초 연구로 다음과 같은 연구 결과를 도출 하였다. Swirl number를 결정 할 때, fuel lean 영역과 fuel rich 영역의 분리를 고려하여 결정해야 하지만, 연소 안정성 또한 무시 할 수 없기 때문에 적절한 계수(Tangential vane의 경우, 0.8 ~ 0.9)를 선택하여야 한다. 버너 영역의 equivalence air ratio의 경우, 1.0 이하에서 선택하되 너무 낮을 경우 연소 불안정을 초래 할 수 있기 때문에 안정적 연소가 가능한 범위(EAR: 0.8 ~ 0.9)에서 결정하여야 한다.

Total equivalence air ratio의 경우, 필요이상 투입하게 되면 NOx 생성을 증가 시킬 수 있다. 그러므로 EAR은 1.15 ~ 1.2 사이에서 결정하는 것이 바람직하다. OFA를 투입 할 경우, 충분한 환원 영역을 확보하는 것이 중요하다. 그러나 환원 영역이 너무 넓을 경우 연소 효율이 감소 할 수 있기 때문에 이를 고려하여 OFA 투입 위치를 결정하여야 한다.

가장 중요한 것은 안정적 연소와 fuel lean, fuel rich 영역의 분리이다. 이를 위해 산화제 공급라인을 현재(2차)보다 많게(3, 4차) 결정하여 버너를 제작하는 것이 NOx를 보다 낮게 형성시킬 수 있을 것이다.

감 사

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업 “2020년 생산기술 산업선도 핵심기술 개발 사업, 신규 저온탈질시스템 개발을 위한 바이오촤 기반 NOx/SOx 저감 특성 규명(1/1) (kitech EO-20-0040)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

References

1. BP Statistical Review of World Energy, June 2016. Available online:https://www.bp.Com/content/dam/bp/pdf/energy-econo

mics/statistical−-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf (acessed on 2 January 2017).
2. World Energy Outlook 2015, 10 November 2015. Available online: https://www.iea.org/bookshop/700-World_Energy_Outlook_2015 (acessed on 2 January 2017).
3. Liu, X., Tan, H., Wang, Y., Yang, F., Mikulčić, H., Vujanović, M., and Duić, N., "Low Nox Combustion and Scr Flow Field Optimization in a Low Volatile Coal Fired Boiler," *J. Environ. Manage.*, **220**, 30-35 (2018).
4. Fan, W., Lin, Z., Li, Y., and Li, Y., "Effect of Temperature on No Release During the Combustion of Coals with Different Ranks," *Energy Fuels*, **24**(3), 1573-1583 (2010).
5. Forzatti, P., "Present Status and Perspectives in De-Nox Scr Catalysis," *Appl. Catal. A: Gen.*, **222**(1-2), 221-236 (2001).
6. Vascellari, M., and Cau, G., "Influence Of Turbulence-Chemical Interaction on Cfd Pulverized Coal Mild Combustion Modeling," *Fuel*, **101**, 90-101 (2012).
7. Schaffel, N., Mancini, M., Szle, k., and Weber, R., "Mathematical Modeling of Mild Combustion of Pulverized Coal," *Combust. Flame*, **156**(9), 1771-1784 (2009).
8. Jovanovic, R., Milewska, A., Swiatkowski, B., Goanta, A., and Spliethoff, H., "Sensitivity Analysis of Different Devolatilisation Models on Predicting Ignition Point Position During Pulverized Coal Combustion In O_2/N_2 And O_2/Co_2 Atmospheres," *Fuel* **101**, 23-37 (2012).
9. Jovanovic, R., Milewska, A., Swiatkowski, B., Goanta, A., and Spliethoff, H., "Numerical Investigation of Influence of Homogeneous/Heterogeneous Ignition/Combustion Mechanisms on Ignition Point Position During Pulverized Coal Combustion in Oxygen Enriched and Recycled Flue Gases Atmosphere," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **54**(4), 921-931 (2011).
10. Toporov, D., Bocian, P., Heil, P., Kellermann, A., Stadler, H., Tschunko, S., Foerster, M., and Kneer, R., "Detailed Investigation of a Pulverized Fuel Swirl Flame in Co_2/O_2 Atmosphere," *Combust. Flame*, **155**(4), 605-618 (2008).
11. Fortunato, B., Camporeale, S., and Torresi, M., "A Gas-Steam Combined Cycle Powered by Syngas Derived from Biomass," *Procedia Comput. Sci.*, **19**, 736-745 (2013).
12. Fortunato, B., Camporeale, S. M., Torresi, M., Fornarelli, F., Brunetti, G., and Pantaleo, A. M., "A Combined Power Plant Fueled by Syngas Produced in a Down Draft Gasifier," In Proceedings of the ASME Turbo Expo, 13-17 (2016).
13. Khan, M., Mmbaga, J., Shirazi, A., Trivedi, J., Liu, Q., and Gupta, R., "Modelling Underground Coal Gasification - A Review," *Energies*, **8**(11), 12603-12668 (2015).
14. Aziz, M., Budianto, D., and Oda, T., "Computational Fluid Dynamic Analysis of Co-Firing Of Palm Kernel Shell and Coal," *Energies*, 137 (2016).
15. Xu, W., Niu, Y., Tan, H., Wang, D., Du, W., and Hui, S., "A New Agro/Forestry Residues Co-Firing Model in a Large Pulverized Coal Furnace: Technical and Economic Assessments," *Energies*, **6**(9), 4377-4393 (2013).
16. Bhuiyan, A. A., and Naser, J., "CFD Modelling of Co-Firing of Biomass with Coal Under Oxy-Fuel Combustion in a Large Scale Power Plant," *Fuel*, **159**, 150-168 (2015).
17. Perrone, D., Castiglione, T., Morrone, P., Barbarelli, S., and Amelio, M., "NOx Emissions for Oxy-Mild Combustion of Pulverized Coal in High Temperature Pre-Heated Oxygen," *Energy Procedia*, **148**, 567-574 (2018).
18. Soud, H. N., and Fukasawa, K., "Developments in Nox Abatement and Control," *IEA Coal Research*, 123-125 (1996).