

Bench-scale 연소로에서 가스 혼소를 통한 초 저 NO_x 석탄 버너 개발 연구

채태영¹, 이재욱¹, 이영재¹, 양 원^{1,*}

¹한국생산기술연구원 탄소중립산업기술연구부문
충남 천안시 서북구 입장면 양대기로길89 한국생산기술연구원

(2022년 2월 10일 접수; 2022년 3월 19일 수정본 접수; 2022년 4월 4일 채택)

Experimental Evaluation of Developed Ultra-low NO_x Coal Burner Using Gas in a Bench-scale Single Burner Furnace

Taeyoung Chae¹, Jaewook Lee¹, Youngjae Lee¹, and Won Yang^{1,*}

¹Thermochemical Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology
89 Yangdaegiro-gil, Ipchang-Myun, Chonan-Si, Chungnam, 330-825, Korea

(Received for review February 10, 2022; Revision received March 19, 2022; Accepted April 4, 2022)

요 약

본 연구는 80 kW 연소로에서 초 저 NO_x 버너를 개발하고 실험한 결과를 나타낸 것이다. 실험은 80 kW 단일 버너 연소로에서 진행되었으며, swirl number 변화, 총 당량비, 1차 / 2차 산화제 비율을 변경하여 진행하였다. 본 연구에서는 가스(LNG)를 보조연료로 사용하여 NO_x 생성량을 크게 감소시킬 수 있었다. 화력발전소에서 석탄 연소 시 발생하는 NO_x의 양은 약 300 ppm이다. 그러나 본 연구에서 사용된 버너는 LNG를 혼소하여 NO_x의 양을 40 ppm까지 감소시킬 수 있었다. 1차 산화제의 투입량이 보조 연료인 가스가 연소될 만큼만 사용하여 가스와 석탄을 동시에 투입하면 연소가스가 버너 출구에서 고온영역을 형성하여 석탄을 휘발시키므로 N 탈휘발에 포함되어 배출된다. 그러므로 이 후 석탄이 연소 되면 석탄내 포함된 N이 거의 없기 때문에 NO_x 생성량이 감소하는 것이다. 본 연구 결과를 바탕으로 실제 화력발전소 버너를 개발한다면 NO_x 생성을 연소 초기에 대량 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

주제어 : 석탄, LNG, NO_x 저감, 미세먼지, 석탄 버너

Abstract : This study developed and tested an ultra-low NO_x burner in an 80 kW combustion furnace. The experiment was conducted in an 80 kW single burner combustion furnace with changing the swirl numbers, total equivalence ratios, and primary/secondary oxidizer ratios. In this study, liquefied natural gas (LNG) was used as an auxiliary fuel to significantly reduce NO_x production. In a thermal power plant, the amount of NO_x generated during coal combustion is about 300 ppm. However, using the burner tested in this study, it was possible to reduce the amount of NO_x generated via LNG co-firing to 40 ppm. If the input amount of the primary oxidizer is enough for the gas to be completely combusted and the gas and coal are added simultaneously, the combusted gas forms a high-temperature region at the burner outlet and volatilizes the coal. As a result, the N contained in the devolatilized coal is discharged. Therefore, when the coal is subsequently burned, the amount of NO_x produced decreases because there is almost no N remaining in the coal. If a thermal power plant burner is developed based on the results of this study, it is expected that the NO_x generation will be significantly lower in the early stage of combustion.

Keywords : Coal, LNG, NO_x emission, Particulate matter, Coal burner

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yangwon@kitech.re.kr; Tel: +82-10-3415-3375; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/kst.2022.28.2.117 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/licenses/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

화력 발전 및 산업용 화석연료의 대량 소비로 지금까지 지구 온난화 및 대기 오염이 지속되고 있다. 일반적인 화석연료 오염 물질로는 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화황(SO₂) 및 화력 발전소에서 생산되는 질소산화물(NO_x) 등이 있다[14]. 질소산화물의 경우 탄화수소가 햇빛에 반응하여 광화학 오존과 스모그가 생성된다. 또한, 현재 미세먼지의 전구물질로 알려져 있기 때문에 대기 중 주요 환경오염 물질 중 하나이다[5,6]. 대기 중에 존재하는 질소 산화물은 소량의 아산화질소(N₂O)와 함께 일산화질소(NO), 이산화질소(NO₂) 등이 있는데, 통틀어 NO_x라고 한다 [7-9]. 전 세계적으로 화석 연료 연소는 NO_x 생성의 가장 큰 원인으로 모든 배출량의 절반 이상을 차지한다[10]. N₂O는 1980년대 온실 가스 효과의 약 6%까지 차지하였다[11]. NO_x는 연료에 포함된 N 및 산화제에 포함된 N₂의 산화에 의해 연소공기에서 방출되는 주요 기상 오염 물질 중 하나이다. 초 저 NO_x 버너에 대한 연구는 이전부터 많은 연구자들에 의해 실험 및 전산해석이 진행되어 왔다[12-17]. Dimethyl ether를 사용하는 가스버너의 경우, 2006년 최소 20 ppm 까지 NO_x를 배출시킬 수 있는 버너가 개발되었으며[12], 기타 일반적인 가스(CH₄, LNG 등)를 사용하는 가스버너의 경우 역시 20 ppm 이하로 NO_x를 배출시킬 수 있도록 개발되어 왔다[13-15]. 그러나 석탄 버너의 경우, 현재까지 최대 약 100 ppm 정도 NO_x를 배출시키는 버너는 개발[16,17] 되었으나 그 이하로 NO_x 배출을 유도하는 버너는 개발되지 못하고 있는 실정이다. 이를 보완하기 위하여 현재 석탄화력 발전소의 경우 일반적으로 선택적 촉매 반응기(Selective catalytic reactors, SCR)를 이용, 연소 후 NO_x를 제거한다[18]. 선택적 비 촉매 반응기(Selective non-catalytic reactors, SNCR)를 사용하여 NO_x 농도를 제어하는 방식도 있으나 촉매가 없기 때문에 SCR보다 저렴하지만 효과적이지 않다. SCR 및 SNCR 기술은 최대 50~80% NO_x 감소를 달성할 수 있다. 그러나 운영 및 유지 보수비용이 비싸다는 단점이 있다[19]. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 ultra low NO_x coal burner를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 버너는 버너만 새로 장착하고 가스라인만 연결하면 되기 때문에 설비에 큰 변경 없이 NO_x의 생성을 억제시킬 수 있는 효과적인 방법이다. NO_x 배출은 연소 온도, 과잉 공기 및 연료, 공기 혼합 속도의 조절을 통해 상당 부분을 제어할 수 있다[20,21]. 본 연구는 석탄 버너를 개발하여 NO_x 생성을 억제시키는 연구로서 실제 화력발전소에 ultra low NO_x coal burner를 장착한다면 NO_x 생성을 연소 초기에 대량 감소시켜 운영 및 유지보수비를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

2. 실험 장치 및 방법

다음 Figure 1은 80 kW 연소로 설비를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 장비는 연소로 사이클론, 라인쿨러, 백필터, 후단 배가스 처리설비로 구성되어 있다. 산화제 승온용 air pre-heater는 따로 설치되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 연소로는 총 5단으로 구성되어 있고 1단의 높이는 500 mm 이다. 연소로 내부 지름은

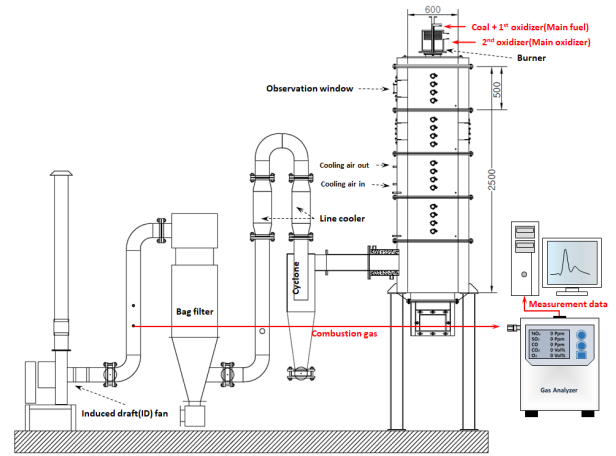


Figure 1. Drawing of single burner furnace combustion systems.

600 mm이다. OFA (over fire air) 는 연소로 2, 3단에 설치되어 있고 2단은 OFA, 3단은 SOFA (separate over fire air) 역할을 하게 된다. OFA는 버너 영역에서 연소 후 미연소된 연료를 완전 연소 시키기 위해 산화제를 투입하는 장치로 일반적으로 버너 연소 영역 이후에 설치되어 있다. 본 연구에 사용된 연소에서도 버너 연소 영역인 1단 이후 2단과 3단에 OFA를 설치하였다. OFA 포트는 연소 후 배출되는 산화제와 빠른 혼합을 위해서 연소로 중심을 기준으로 15°로 설치하였다. 연소현상은 주로 1, 2단에서 나타나기 때문에 2단에 관측창을 설치하였고 연소로 냉각을 위한 냉각 공기는 1~3단까지 투입하였다. 연소 후 생성되는 회분 중 상대적으로 굵은 입자 포집을 위해 사이클론을 설치하였고 백필터 전단에 연소가스 온도 냉각을 위한 라인쿨러를 설치하였다. 온도는 연소로 벽면에서 측정하였고 연소가스는 회분 오염을 방지하기 위해 bag filter 후단에서 측정하였다. 사용된 분석기는 Non-Dispersive Infrared Gas Analyzers (ND-IR)로 ABB의 AO2000을 사용 하였다.

다음 Figure 2는 초 저 NO_x 버너를 나타낸 것이다. 위쪽 그림은 버너 제작 도면을 나타낸 것이고 아래쪽 그림은 swirl number 계산식에 나타난 기호의 위치를 설명하기 위해 나타낸 것이다. 버너는 tangential vane swirl type coal burner로서 버너 중앙에 보조 연료인 LNG를 투입할 수 있도록 제작하였다. 버너 출구는 꽃잎 모양으로 되어있고 LNG 노즐은 잎 모양과 같은 부분으로 4방향으로 가스가 배출되도록 설치 되어 있다. 버너 출구를 꽃잎 모양으로 제작한 이유는 석탄을 꽃잎 쪽으로 집중 분사하여 LNG 연소구간에 빠르게 접촉하게 하기 위함이다. 석탄이 투입 될 때 꽃잎 모양 쪽으로 석탄이 배출되는데, LNG 또한 같은 방향으로 배출되기 때문에 석탄과 LNG의 혼합이 빠르게 진행되는 것이다. 산화제는 3차 산화제까지 있고 2차 산화제의 경우 1차 산화제 바로 외곽에서 투입된다. 2차 산화제는 석탄과 혼합되는 산화제양에 따른 변화를 보기 위해 설치한 것으로 실제 상용 버너에서는 없어도 무방하다. 3차 산화제는 swirl을 설치하여 swirl number에 따른 변화를 살펴왔다. Swirl number는 다음식을 기준으로 설정 하였다. Swirl number는 선회류의 강도를 표현하는 것으로 숫자가 클수록 강한 선회

하 95%로 미분되어 투입되었고, 1~3 차 산화제 투입 평균 온도는 300 °C 이다. 2차 실험 조건의 경우, 모든 실험 조건은 1차와 동일하고 2, 3차 산화제 swirl number만 변경하여 진행 하였다. 2차 실험의 경우, 2차 산화제는 강하게 3차 산화제는 약하게 swirl number를 결정한 경우라고 할 수 있다. 나머지 모든 조건은 1차 실험과 동일하기 때문에 생략하도록 하겠다.

3.2. 3차 실험 조건

3차 실험은 2차 산화제를 투입하지 않고 나머지를 모두 3차에 투입하는 실험이다. 즉 1, 2차 실험 세부 실험 조건 1 case에 해당되는 것으로 swirl number만 3가지로 변경하여 실험한 것이다. 3차 실험은 3차 산화제의 swirl number 변화에 따른 NO_x 생성량 변화를 측정하기 위한 실험이다. 3차 swirl number는 3가지로 0.38, 0.63, 0.94이다. 나머지 조건은 1, 2차 실험과 동일하게 진행하였다.

4. 실험 결과

4.1. 1차 실험 결과 (2nd SN: 0.32, 3rd SN: 0.63)

4.1.1 온도 분포

다음 Figure 3은 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림 상단의 숫자는 실험 조건을 나타낸 것이고 그 이후가 조건별 벽면 온도 분포이다. 조건별 큰 차이는 발생하지 않으나 온도가 전체적으로 연소로 2단부터 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, OFA가 투입된 후 연소로 4단 상부의 온도가 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 연소로 1단에서는 탈휘발이 진행되어 주연소가 진행되지 않고 그 이후에 주연소가 진행되었다는 것을 나타내는 것이다. 그렇기 때문에 연소로 1단의 벽면 온도는 나머지 단보다 낮은 것을 볼 수 있었다. 2차 실험과 3차 실험 온도 분포의 경우, 1차 실험과 큰 차이가 없어 생략하였다.

4.1.2. 연소가스 조성

다음 Figure 4는 출구 연소가스 농도를 나타낸 것이다. 생성된 NO_x의 경우는 생성량의 절대값 확인을 위해 고체 연료 연소

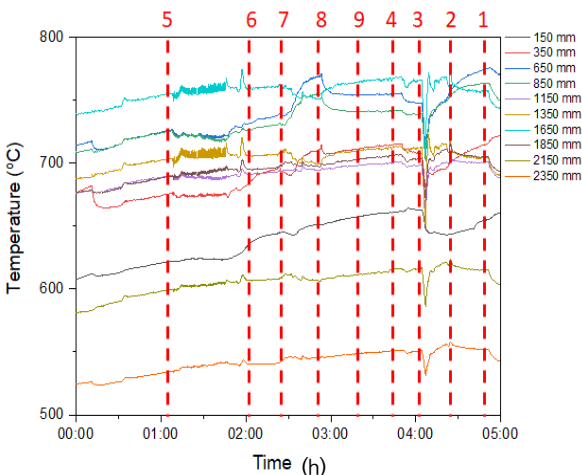


Figure 3. First result of temperature distribution.

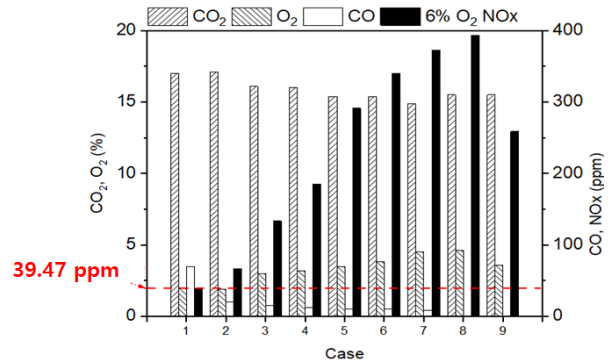


Figure 4. First result of combustion gas concentration.

후 생성되는 연소가스 보정 농도인 O₂농도 6%로 생성값을 보정 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 2차 산화제가 증가할수록 NO_x 생성량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 실험을 위해 제작된 버너는 연소 초기에 fuel rich 영역을 만들어 NO_x의 생성을 억제 시키는 방법을 사용한 버너이다. 이 때, LNG를 사용하면 연소 속도가 석탄보다 상대적으로 빠른 LNG가 우선 연소하여 연소로 상부에 고온영역을 생성시킨다. 이 경우, LNG만 연소될 정도의 산소만 1차 산화제로 공급된다면 석탄을 연소시킬 산소가 없기때문에 석탄은 고온에서 빠르게 탈휘발이 진행된다. 그 후 연소로 중단부로 가면서 충분한 산소와 만나 연소가 진행되면 탈휘발 과정에서 배출되는 N은 N₂로 전환되어 NO_x의 생성이 억제되는 것이다. 그러므로 연소 초기에 LNG를 연소시킬 만큼의 산화제를 공급하고 나머지 산화제는 그 이후 연료와 혼합되게 산화제의 비율을 조절하는 것이 매우 중요하다. 그런데, 2차 산화제가 증가하게 되면 연소 초기에 산소와 연료가 결합하게 되어 LNG 연소로 고온영역이 형성된 연소로에서 석탄이 동시에 연소가 진행되기 때문에 오히려 NO_x 생성량이 증가하게 되는 것이다. 그러므로 1차 산화제는 LNG를 연소시킬 만큼의 양만 투입하고 나머지는 3차 산화제에 투입하는 것이 바람직하다. 그런데 본 연구를 위해 제작된 버너는 1차 라인 외곽에 2차 라인이 있는데, 1차 라인의 경우, 출구가 꽃잎 모양을 하고 있기 때문에 1차 라인에서 배출되는 석탄과 2차 라인에서 배출되는 산화제가 직접 혼합되기 때문에 2차 산화제의 양이 증가하게 되면 석탄의 동시 연소가 진행되어 그림과 같은 결과가 나타나는 것이다. 2차 산화제를 투입하지 않고 나머지를 3차 산화제를 모두 투입하였을 때(case 1), NO_x 생성량이 39.5 ppm을 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 버너 제작 과정에서 고려하였던 결과로서 안정적 연소와 low NO_x 생성 현상을 나타낸다고 볼 수 있다.

4.2. 2차 실험 결과 (2nd SN: 0.54, 3rd SN: 0.38)

4.2.1. 연소가스 조성

다음 Figure 5는 2차 실험조건별 출구 연소가스 농도를 나타낸 것이다. 1차 실험 결과와 유사한 현상이 나타난 것을 볼 수 있었다. 전체적인 경향은 유사하지만 생성된 NO_x의 분포 중 최저값이 75 ppm으로 1차 실험에 비해 높게 나타나는 것을 볼 수

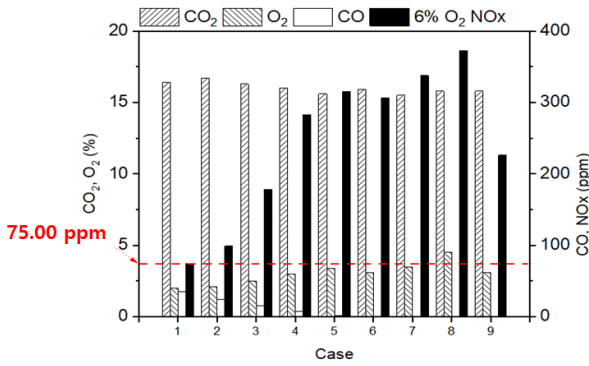


Figure 5. Second result of combustion gas concentration.

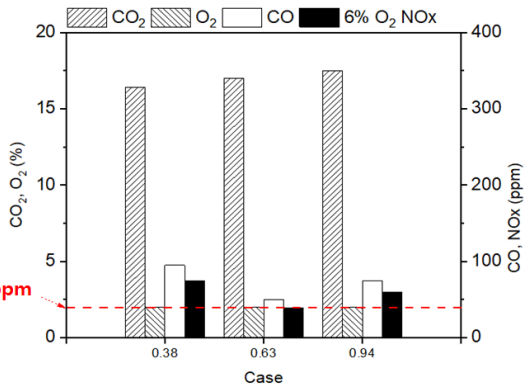


Figure 6. Third result of combustion gas concentration.

있다. 이것은 swirl number의 변화 때문에 나타난 현상으로 3차 swirl number가 1차 실험보다 약하기 때문에 탈휘발이 충분하게 진행되기 전 연료와 3차 산화제가 혼합되어 나타난 현상이라고 볼 수 있다.

4.3. 3차 실험 결과

4.3.1. 연소가스 조성

다음 Figure 6은 3차 실험 결과 연소가스 생성량을 비교한 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 swirl number 0.63일 때 NO_x 생성량은 최저값을 나타내었고, swirl number 0.38과 0.94에서는 약간 증가한 값을 나타낸 것을 알 수 있었다. 초 저 NO_x 버너 제작 시 고려해야 할 사항은 버너 swirl number와 연소로 크기이다. 본 연구에서는 3차 산화제 swirl number를 0.94로 강하게 할 경우, 산화제가 연소로 벽면을 치고 중앙으로 몰리기 때문에 swirl number 0.63에 비해 NO_x 생성량이 증가하는 것이다. 연소로 내경이 더 큰 경우라면 NO_x 생성량이 더 감소할 가능성도 있지만 본 실험에 사용된 연소로에서는 swirl number 0.63의 경우, 가장 낮은 NO_x 생성량을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러므로 NO_x 생성 억제를 위해서는 버너, 연소로 크기 별 swirl number를 다르게 설정하여 적절한 값을 결정해서 연소를 진행해야 NO_x 생성량을 억제시킬 수 있을 것이다.

4.4. Ultra low NO_x burner 연소 형태

다음 Figure 7은 본 연구에서 제작한 버너의 연소 현상을 그

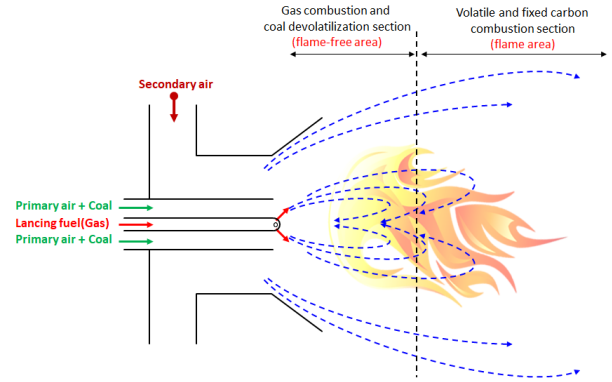


Figure 7. Combustion prediction diagram.

림으로 나타낸 것이다. 연소로 중앙에 설치된 LNG 노즐에서 분사되는 LNG의 주목적은 석탄 이송용 1차 산화제와 빠른 혼합으로 연소하는 것이다. 이때 생성되는 고온의 열을 사용하여 석탄을 탈휘발시켜 석탄 내에 포함된 N을 빠르게 제거하는 것이 중요하다. 이때 산화제의 양이 필요 이상으로 많으면 석탄의 연소가 같이 진행되기 때문에 LNG를 연소시킬 수 있는 최소량의 산화제를 1차 석탄 이송라인에 투입해야 한다. 또한, 탈휘발된 연료와 산화제를 완전 혼합시키기 위해서는 2차 라인의 swirl number가 중요하다. 2차 라인의 swirl number가 약하면 빠르게 혼합되어 탈휘발 효과가 적어지고 너무 강하면 벽면을 치고 돌아오는 산화제에 의해 탈휘발 효과가 적어지게 되기 때문이다. 그러므로 2차 산화제의 swirl number는 버너와 연소로의 형태에 따라 달라지게 된다.

5. 결 론

본 연구는 초 저 NO_x 석탄 버너를 개발하는 것으로 석탄 등 고체 연료를 사용하여 연소할 경우, 인체에 유해한 미세먼지 전구물질인 NO_x 생성량을 연소 중 미연에 감소시킬 수 있는 매우 유용한 기술이다. 현재 석탄화력발전은 미래가 불투명한 산업이다. 정부는 제26차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP26)에서 ‘탈석탄 전환 선언’에 동참하여 2039년까지 석탄화력발전을 중단하기로 선언하였기 때문에 본 연구에서 개발된 기술은 장기적으로 석탄화력발전소에서는 활용이 어렵다고 볼 수 있다. 그러나 고체 연료를 사용하여 화염을 형성시켜 발전을 시키는 곳에서는 어디서든 본 연구에 사용된 원리를 기본으로 버너를 제작하여 NO_x를 확실하게 저감시킬 수 있는 기술이라고 할 수 있다.

본 연구에서 개발된 버너를 제작하기 위해 필요한 조건은 다음과 같다.

- 버너는 버너 중앙에 가연성 가스(LNG, CH₄, etc)를 투입하여 석탄을 빠르게 탈휘발 시키는 형태로 버너 제작하여야 한다.
- 연소된 가스가 석탄을 집중적으로 탈휘발시킬 수 있도록 가스 연소구간 내 석탄을 투입하여야 한다.
- 가연성가스와 석탄이 직접적으로 만나서 가스가 연소되어야 한다.

- 1차 산화제는 가연성 가스를 연소시킬 만큼의 양만 투입하여야 한다.
- 2차 산화제가 석탄이 탈휘발 되기 전 혼합되지 않도록 제작하여야 한다.
- 동일 버너라도 연소로 형태와 연소로 크기에 따라 swirl number를 다르게 결정해야 한다.

감사

본 연구는 한국전력공사 주력연구개발과제인 “유연운전용 보일러 연소 및 환경설비 최적화 기술 개발(R20GA10)”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Chae, T., “Study on Operating Characteristics for NO_x Reduction in Ultra Low NO_x Burner Combustion Using 80 kW Furnace,” *Clean Technol.*, **26**(3), 211-220 (2020).
2. Ahn, K., and Kim, H., “An experimental study on the combustion characteristics of a low NO_x burner using reburning technology,” *KSME International Journal*, **16**(7), 950-958 (2002).
3. Van, A., L, S., G. J., and Beesteheerde, J., “Low-NO_x hydrogen burner,” *Int. J. Hydrogen Energy*, **21**(6), 445-449 (1996).
4. Liming R., Jingxue, A., Chunyu, W., and Lei, W., “Influence of Low NO_x Burner Retrofit on the Performances of a Boiler,” *Ad. Mate. Res.*, **1023**, 116-124 (2014).
5. Dutka, M., Ditaranto, M., and Løvås, T., “Application of a Central Composite Design for the Study of NO_x Emission Performance of a Low NO_x Burner,” *Energies.*, **8**, 3606-3627 (2015).
6. Chae, T., “Characteristics of syngas reburning in a coal firing furnace,” *Journal of thermal environmental & engineers.*, **15**(1) 54-61 (2020).
7. Zhang, Y., Xing, Y., and Chen, S., “CFD investigation based on gas burner with low-NO_x strategy of fuel-staging,” *2nd International Workshop on Renewable Energy and Development.*, (2018).
8. Sorrentino, G., Sabiab, P., Bozzab, P., Ragucci, R., and Joannonb, M., “Low-NO_x conversion of pure ammonia in a cyclonic burner under locally diluted and preheated conditions,” *Appl. Energ.*, **254** 676-683 (2019).
9. Zhou, H., Yang, Y., and Wang, L., “Numerical investigation of gas-particle flow in the primary air pipe of a low NO_x swirl burner - The DEM-CFD method,” *Particuology.*, **19**, 133-140 (2015).
10. Chae, T., “NO_x Reduction by Co-Firing and Reburning of Biomass in IMWth Coal Combustion,” *J. Korean Soc. Combust.*, **25**(3) 48-53 (2020).
11. Chae, T., Lee, J., Yang, W., and Ryu, C., “Characteristics of syngas reburning in a natural gas firing furnace-Effects of combustible gas species in the syngas,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, **30**(8) 3861-3868 (2016).
12. Ryosuke, M., Mamoru, O., Isao, I., Shingo, S., and Masahiro, T., “Development of low-NO_x DME multi-port burner,” *JSME International Journal*, **49**(2) 245-253 (2006).
13. Antonio, A., Bruno, F., Alessandro, I., and Matteo, C., “Numerical analysis of a low NO_x partially premixed burner for industrial gas turbine applications,” *Energy Procedia*, **45** 1382-1391 (2014).
14. Marcin, D., Mario, D., and Terese, L., “Application of a Central Composite Design for the Study of NO_x Emission Performance of a Low NO_x Burner,” *Energies*, **8** 3606-3627 (2015).
15. Yu, Z., Yuming, X., and Sheng, C., “CFD investigation based on gas burner with low-NO_x strategy of fuel-staging,” *2018 2nd International Workshop on Renewable Energy and Development*, **153** 1-12 (2018).
16. Masayoshi, K., Michitaka, I., Hisao, M., Takashi, K., and Yoshihiko, E., “Improvement of low lopad combustion stability for advanced low NO_x burner,” *JSME International Journal.*, **41**(4) 1071-1078 (1998).
17. Marco, T., Francesco, F., Bernardo, F., Sergio, M., and Alessandro S., “Assessment against experiments of devolatilization and char burnout models for the simulation of an aerodynamically staged swirled low-NO_x pulverized coal Burner,” *Energies*, **10**(1) 66-89 (2017).
18. Torresi, M., Fornarelli, F., Fortunato, B., Camporeale, S., and Saponaro, A., “Assessment against experiments of devolatilization and char burnout models for the simulation of an aerodynamically staged swirled Low-NO_x pulverized coal burner,” *Energies*, **10**(1) 66-90 (2017).
19. Chen, S., Xing, Y., Li, A., “CFD investigation on Low-NO_x strategy of folded flame pattern based on fuel-staging natural gas burner,” *Appl. Therm. Eng.*, **112** 1487-1496 (2017).
20. Tian, D., Zhong, L., Tana, P., Ma, L., Fang, Q., Zhang, C., Zhang, D., and Chen, G., “Influence of vertical burner tilt angle on the gas temperature deviation in a 700 MW low NO_x tangentially fired pulverised-coal boiler,” *Fuel Process. Technol.*, **138** 616-628 (2015).
21. Ti, S., Chen, Z., Li, Z., Zhang, X., Zhang, H., Zou, G., Zeng, L., and Zhu, Q., “Effects of the outer secondary air cone length on the combustion characteristics and NO_x emissions of the swirl burner in a 0.5 MW pilot-scale facility during air-staged combustion,” *Appl. Therm. Eng.*, **86** 318-325 (2015).