

국내 미이용 바이오매스 순환유동층 연소에서 NO_x 저감을 위한 air-staging 효과

윤상희*** · 백건욱**** · 문지홍* · 조성호* · 박성진* · 김재영* · 서명원* · 윤상준* ·

윤성민* · 이재구**** · 김주식** · 문태영*†

*한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

**서울시립대학교 환경공학과

02504 서울특별시 동대문구 서울시립대로 163

***충남대학교 에너지과학기술대학원

34134 대전광역시 유성구 대학로 99

****한국에너지기술연구원 FEP융합연구단

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2020년 10월 6일 접수, 2020년 11월 2일 수정본 접수, 2020년 11월 5일 채택)

Air-staging Effect for NO_x Reduction in Circulating Fluidized Bed Combustion of Domestic Unused Biomass

Sang-Hee Yoon***, Geon-Uk Beak****, Ji-Hong Moon*, Sung-Ho Jo*, Sung-Jin Park*, Jae-Young Kim*, Myung-Won Seo*, Sang-Jun Yoon*, Sung-Min Yoon*, Jae-Goo Lee****, Joo-Sik Kim** and Tae-Young Mun*†

*Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research (KIER), 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea

**Department of Environmental Engineering, University of Seoul, 163, Seoul-daero, Dongdaemun-gu, Seoul, 02504, Korea

***Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

****FEP Convergence Research Center, Korea Institute of Energy Research (KIER), 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129, Korea

(Received 6 October 2020; Received in revised from 2 November 2020; accepted 5 November 2020)

요 약

미세먼지 전구체인 질소산화물(NO_x)에 대한 대기배출부과금 제도가 2020년부터 국내에 도입 및 시행됨에 따라 이를 저감하기 위한 경제적인 연소기술 개발은 매우 시급한 실정이다. 본 연구에서는 해외 우드펠릿 대체재로서 REC(Renewable Energy Certificates) 확보가 가능한 국내 미이용 산림 바이오매스를 연료로 하여 0.1 MW_{th}급 순환유동층 연소 설비에서 NO_x 저감을 위한 air-staging 효과를 고찰하였다. 운전 변수로는 air-staging 적용 유무, 3차 공기 공급 높이(6.4 m, 8.1 m, 9.4 m) 그리고 air-staging 비율(1차 공기:2차 공기:3차 공기=91%:9%:0%, 82%:9%:9%, 73%:9%:18%) 변화이며 운전 변수에 대한 배기가스 내 NO와 CO 농도, 연소로 높이별 온도와 압력 프로파일, 포집된 비산재(fly ash) 내 미연탄소 함량과 연소효율을 분석하였다. 3차 공기를 가장 높은 9.4 m에서 공급한 air-staging 운전 시 NO 농도는 100.7 ppm으로 air-staging을 적용하지 않은 운전 조건(148.8 ppm)보다 32.3% 감소하지만 CO 농도는 오히려 52.2 ppm에서 99.8 ppm으로 91% 증가하였다. 더불어, NO 농도의 저감을 위한 환원영역과 CO 농도의 저감을 위한 산화영역 확보를 위해 3차 공기 공급 높이를 6.4 m로 유지하며 3차 공기 공급량을 늘리고 1차 공기 공급량을 낮춘 air-staging 운전 조건(73%:9%:18%)에서는 NO와 CO 농도가 각각 90.8 ppm과 66.1 ppm으로 air-staging 적용 조건 중 가장 감소되는 것을 확인하였다. 이러한 최적 운전 조건에서 연소효율 역시, air-staging을 적용하지 않은 운전 조건의 연소효율(98.3%) 보다 높은 99.3%임을 확인하였다.

Abstract – Air emission charge for nitrogen oxide as a precursor of fine dust has been introduced and implemented within the country from 2020. Therefore, the development of economical combustion technology for NO_x reduction has got more needed urgently. This study investigated the air-staging effect as a way to reduce the NO_x during combustion of domestic unused forest biomass, recently possible to secure REC (Renewable Energy Certification) as a substitute for

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mty1980@kier.re.kr

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.

overseas wood pellets in a 0.1 MW_{th} circulating fluidized bed combustion test-rig. Operating conditions were comparison with and without air-staging, the supply position of tertiary air (6.4 m, 8.1 m, 9.4 m in the combustor) and variation of air-staging ratio (Primary air:Secondary air:Tertiary air=91%:9%:0%, 82%:9%:9%, 73%:9%:18%). NO and CO concentrations in flue gas, profiles of temperature and pressure at the height of the combustion, unburned carbon in sampled fly ash and combustion efficiency on operating conditions were evaluated. As notable results, NO concentration with air-staging application under tertiary air supply at 9.4 m in the combustor reduced 100.7 ppm compared to 148.8 ppm without air-staging while, CO concentration increased from 52.2 ppm without air-staging to 99.8 ppm with air-staging. However, among air-staging runs, when tertiary air supply amount at 6.4 m in the combustor increased by air-staging ratio (Primary air:Secondary air:Tertiary air=73%:9%:18%), NO and CO concentrations decreased the lowest 90.8 ppm and 66.1 ppm, respectively. Furthermore, combustion efficiency at this condition was improved to 99.3%, higher than that (98.3%) of run without air-staging.

Key words: Circulating fluidized bed combustion, Unused forest biomass, Air-staging, NO, Combustion efficiency

1. 서 론

순환유동층 보일러(Circulating fluidized bed boiler, CFB boiler)는 바이오매스 및 폐기물을 활용할 수 있는 연료다변화(Fuel flexibility)가 용이한 발전기술이다[1]. 또한, 순환유동층 보일러는 타 연소기술에 비해 비교적 낮은 온도(800-900 °C)로 운전되어 산화제로 투입되는 공기 내 질소(N₂)에 의한 열적 질소산화물(Thermal-NO_x) 발생이 적은 장점을 가진다[1,2,3]. 목질계 바이오매스는 석탄에 비해 연료 내 질소(N), 황(S) 함유량이 낮아 연소 시 배기가스 내 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x) 농도가 적게 발생된다[4,5]. 따라서 순환유동층 보일러에서 목질계 바이오매스를 연료로 사용할 경우 NO_x 저감에 매우 효과적이다. 하지만 국내 바이오매스 사용량은 약 8-9%에 불과하고 대부분 해외 우드펠릿을 사용하고 있어 많은 국부유출이 발생되고 있다[6]. 이에, 정부는 벌채 산물 중 원목 규격에 미치지 못하거나 수집이 어려워 이용이 원활하지 않은 국내 미이용 산림 바이오매스(현재, 5종으로 분류: 목부성 원재료, 병충해 피해목, 임목 부산물, 가로수 조성관리, 산불 피해목)를 활용할 수 있는 정책

으로 미이용 산림 바이오매스를 사용하여 발전하는 사업장에 REC(Renewable energy certificate) 가중치를 전소 시 2.0, 혼소 시 1.5로 공급하는 제도를 시행 중이다. 최근 정부합동 미세먼지 관리 종합대책의 후속 조치로 2020년부터 미세먼지 전구체인 NO_x를 배출하는 사업장에 대한 질소산화물 배출부과금 제도가 국내에서도 도입 및 시행되고 있으며 배출부과금(기본부과금+초과부과금)은 NO_x kg당 2020년 1,490원, 2021년 1,810원, 2022년 2,130원으로 증가 될 예정[7]으로 사업장 운영에 부담이 가중될 전망이다. 이에, 기존 순환유동층 연소기술을 활용하는 사업장에서는 로 내 탈질이 가능한 선택적 비촉매 환원기술(SNCR; Selective non catalytic reduction)을 적용하여 NO_x에 대한 대기환경기준을 만족하는 수준으로 운영하였지만 배출부과금 도입으로 인해 후단 공정인 선택적 촉매 환원기술(SCR; Selective catalytic reduction) 설비 설치가 불가피한 상황이다. 따라서 기존 선택적 비촉매 환원기술에 의한 로 내 탈질이 가능했던 순환유동층 보일러의 장점에도 불구하고 질소산화물 배출부과금 제도에 대응하기 위해 연소로 내에서 NO_x를 더욱 저감할 수 있는 연소제어 연구가 매우 중요하게 되었다. Fig. 1은

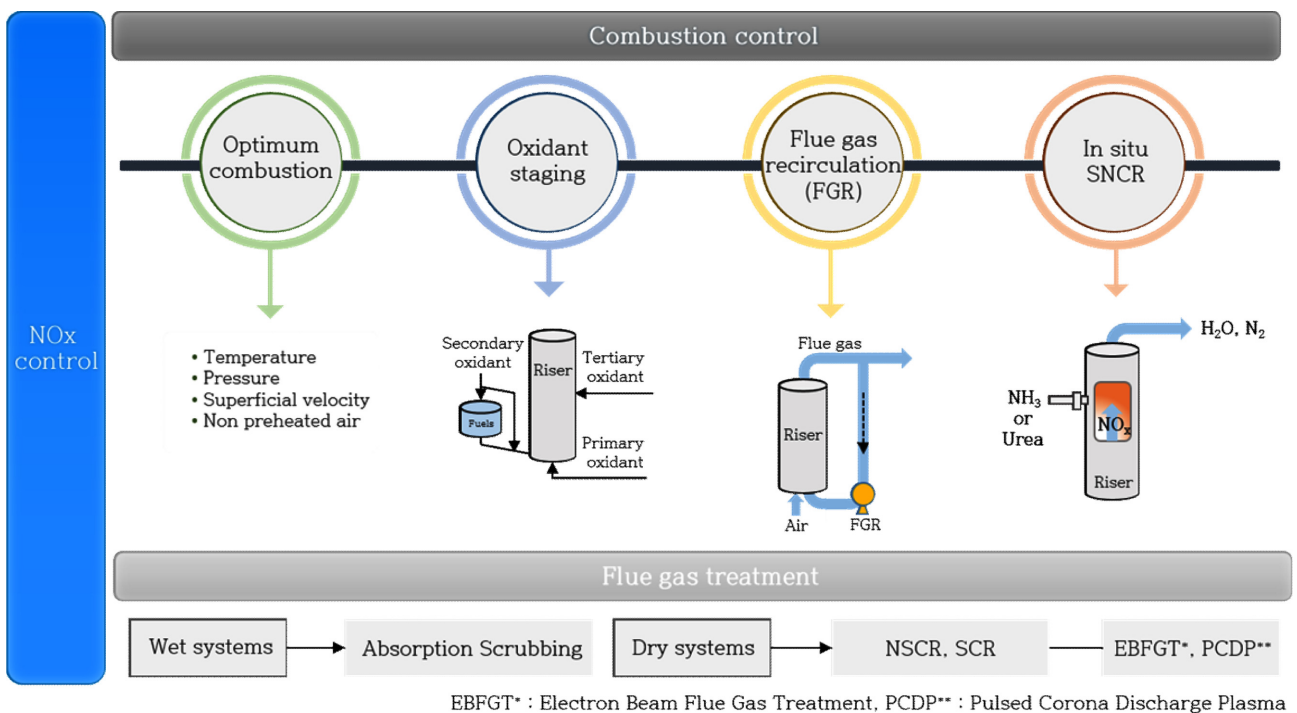


Fig. 1. NO_x reduction technologies for combustion with solid fuels [3,8].

고체 연료 연소 시 NO_x 저감을 위한 대표 기술들을 나타내고 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, NO_x 저감 기술은 연소제어(Combustion control) 방식과 후단 배기가스 처리(Flue gas treatment) 방식으로 나눌 수 있다[8,9]. 전자는 연소로 내에서 NO_x 생성을 감축시키는 것이 목적인 반면, 후자는 연소 시 생성되는 NO_x를 별도 후단 설비에서 감축하는 것이 목적이다. 후자 기술들 중 선택적 촉매 환원기술이 널리 사용되고 있지만 환원제 공급 및 촉매 교체 등 운영비용 증가 때문에 연소로 내에서 최대한 NO_x를 줄이는 노력이 필요하다. 전자의 기술로는 750 °C 이상 고온에서 환원제를 주입하여 저감하는 선택적 비촉매 환원기술 방식이 대표적이며 이 외에도, 연소로 내 산화제 공급 위치 및 공급량을 제어하는 air-staging 기법이 꾸준히 연구되고 있다[10-13]. Air-staging 기법은 연소용 공기를 연소로 높이에 따라 나누어 주입하는 공기 배분 제어를 통해 NO_x 생성이 아닌 N₂O로의 환원을 장려하는 기술이다[10]. Basu[14]는 공기연소에서 NO_x 배출에 대한 다양한 운전 변수들의 영향을 연구하였으며 그 중 air-staging 방법은 순환유동층 보일러에서 NO_x를 제어하는 가장 효과적인 방법이라고 소개한 바 있다. Redick et al.[15]는 primary air의 화학 양론적 비율과 secondary zone에서의 체류 시간이 오염물질 형성에 가장 중요하다는 것을 밝혔으며, de Diego et al.[16]는 온도, 과잉공기비, 3차 공기 비율과 같은 운전 조건들이 NO_x와 N₂O에 미치는 영향을 연구하였으며 연소로 온도가 800 °C에서 870 °C로 상승하였을 때 NO 농도는 62 ppm에서 142 ppm으로 증가하고 N₂O 농도는 242 ppm에서 180 ppm으로 감소하는 결과를 제시하였다. 또한, 과잉공기비를 5%에서 30%까지 증가한 경우, 산소 공급 증가로 인해 NO와 N₂O 농도는 각각 43.5%와 36.7% 증가했음을 보고하였다. Wang et al.[17]는 CFB 연소 설비에서 2차 공기 공급 높이를 2차 공기 비율에 대한 NO 감소에 대한 영향을 살펴본바 있는데 2차 공기 공급 높이가 1.32 m에서 1.83 m로 증가할 때, NO 농도는 101 ppm에서 76 ppm으로 감소하였으며, 1.83 m에서 2차 공기 비율을 0%에서 40% 까지 증가하였을 때 NO 감소율이 42.9%임을 보고하였다. Carroll et al.[18]은 다양한 바이오매스들 이용한 air-staging 적용 실험에서 환원영역인 연소로 하부에서의 체류 시간이 길어짐에 따라 NO 농도가 최대 30%까지 감소됨을 보고하였다.

현재까지 보고된 선행연구들로부터 air-staging 기술이 NO_x 저감에 효과적이라는 연구결과들은 확인할 수 있었으나 순환유동층 연소 기술 관점에서 NO_x 농도 뿐 아니라 CO 농도 변화 및 NO, CO 동시 저감에 대한 선행연구들에 대한 정보는 매우 부족하였으며, air-staging 적용에 따른 연소로 내 온도, 압력 프로파일 특성 및 연소 후 생성되는 회재 내 미연탄소(UBC; Unburned carbon) 분석을 이용한 연소효율과 관련된 연구들 또한 수행되지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 국내 미이용 산림 바이오매스를 이용한 0.1 MW_{th}급 순환유동층 연소에서 air-staging 적용 유무, 3차 공기 공급 높이 변화 및 air-staging 비율 변화에 따른 배기가스 내 오염물질 농도(NO, CO, N₂O, SO₂) 특성, 연소로 높이별 온도와 압력 프로파일 특성 그리고 포집된 비산재 내 미연탄소 함량을 통한 연소효율 분석에 대해 고찰하고자 한다. 이러한 결과들은 REC 확보가 가능한 미이용 산림 바이오매스 보급 확산뿐 아니라 실제 유동층 보일러에서 air-staging 적용을 통한 NO_x 저감 방안에 대한 연소제어 지식으로 활용이 가능할 것이다.

2. 실 험

2-1. 연료 및 유동사

본 연구에 사용된 연료는 병충해 피해목과 임목 부산물의 줄기부 80~90%와 가지부 10~20%를 혼합 분쇄한 국내 미이용 산림 바이오매스 펠릿으로 직경과 길이는 각각 6~7 mm와 13~30 mm 내외였다. 연료의 공업분석(ASTM D7582-15), 원소분석(환경부고시 제 2014-135호), 발열량분석(환경부고시 제 2014-135호) 결과 및 회용점 온도(Ash fusion temperature, ISO 540:2008) 결과를 Table 1에 나타내었다. 또한, 국내 A발전사에서 바이오매스 혼소를 위해 사용 중인 해외 우드펠릿의 성상들을 제시하였으며 미이용 산림 바이오매스 연료 성상과 비교하였다.

Table 1에서 볼 수 있듯이, 연료 내 질소, 황 함량 및 발열량은 현재 사용 중인 해외 우드펠릿 성상과 비슷하였으며 회 용점 온도(1,277 °C)와 순환유동층 조업온도(800~900 °C 이하)를 고려할 때, 회재에 의한 slagging 발생률은 크지 않을 것으로 판단되었다. 더불어, 순환유동층 연소 시 열매체 역할을 수행하는 유동사(Silica sand)의 평균 입도는 0.481 mm이다.

2-2. 순환유동층 연소설비

본 연구에서 사용된 실험 설비는 0.1 MW_{th}급 순환유동층 연소 시스템이며 Fig. 2에 개략도를 나타내었다.

주요 공정들은 LNG burner 예열장치, 공기탱크, 연소로(직경: 0.15 m, 높이: 10 m) 1차, 2차 cyclone, loop-seal, 1차 열교환기, bag-filter, 2차 열교환기, 응축설비(FGC; Flue gas condenser), 원료(연료, 유동사) 공급설비 등으로 이루어져 있다. 순환유동층 연소 운전 절차로는 먼저, LNG burner 예열장치를 이용하여 유동사가 채워져 있는 연소로의 bed 온도를 400~500 °C 정도로 승온한 뒤 연료 호퍼와 연결된 스크류 피더를 통해 연료를 정량 공급한다. 이후 연료의 자가발열(Auto-thermal)을 통해 연소로 bed 온도를 800 °C 이상으로 유지한다. 이 때 연소용 공기는 압입송풍기(Forced draft fan; FD fan)에 의해 공기탱크로 유입되고 탱크 내 압력을 0.2 bar로 유지하

Table 1. Properties of fuels

Fuel	Unused Biomass Pellet (Domestic)	Wood Pellet (Oversea)
Proximate Analysis ^a (wt.%)		
Moisture	5.4	7.6
Ash	3.0	2.2
Volatile	74.0	90.2
Fixed carbon	17.6	
Ultimate Analysis ^b (wt.%)		
Carbon	49	91.53
Oxygen	41.6	
Hydrogen	5.9	5.7
Nitrogen	0.2	0.3
Sulfur	0.03	0.04
Chlorine	0.07	0.05
Ash Deformation Temp. (°C) ^c	1277	>1500
HHV (kcal/kg) ^b	4,710	4,690
LHV (kcal/kg) ^a	4,120	3,960

^aAs received, ^bDried basis, ^cReducing atmosphere, HHV: High heating value, LHV: Low heating value

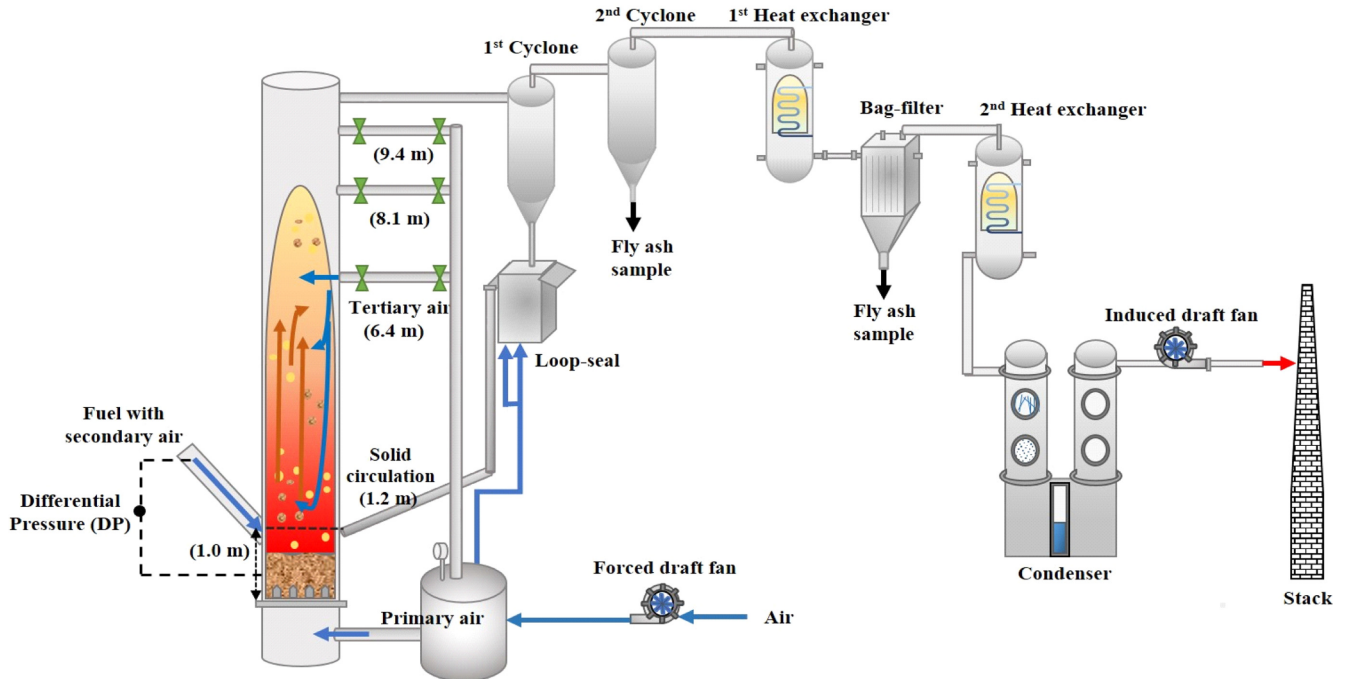


Fig. 2. Schematic diagram of a 0.1 MW_{th} pilot-scale CFBC test-rig.

며 1차 공기(Primary air; PA), 2차 공기(Secondary air; SA), 3차 공기(Tertiary air; TA)를 운전 조건에 맞춰 정량적으로 공급한다. 여기서, 1차 공기는 연소로 하부의 wind-box로 유입되어 분산판 노즐을 통해 연소로로 주입되는 공기, 2차 공기는 분산판 기준 1.0 m에서 연료와 함께 주입되는 공기, 3차 공기는 분산판 기준 6.4 m, 8.1 m, 9.4 m에서 별도 공급 배관을 통해 주입되는 공기를 의미한다. 열매체(보통 유동사, 미반응 연료, 회재 등 혼합)들의 순환 영역인 연소로, 1차, 2차 cyclone, loop-seal 내부에는 각각 0.1 m 두께로 내화재 처

리가 되어 열팽창에 의한 설비 손상을 방지하고자 하였다. 1차, 2차 열교환기는 chiller를 이용하여 냉각수 공급제어를 통해 배기가스 온도를 감소시키는 역할을 하며 배기가스 온도는 1차 열교환기와 2차 열교환기 통과 후 각각 250 °C와 90 °C 이하로 감소한다. 2차 cyclone과 bag-filter 하부에는 비산재 포집을 위한 호퍼가 설치되어 있으며 2차 cyclone에서 회수되는 비산재는 원심력에 의한 기고 분리(Gas-solid separation)를 통해, bag-filter 에서 포집된 비산재는 주기적인 펄싱(Pulsing)을 통해 회수된다. 2차 열교환기를 통과한

Table 2. Operating conditions and results

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
Fuel feeding rate [kg/h]	11.4	11.1	11.0	11.6	10.7
Thermal input [kW _{th}]	62.3	60.6	60.3	63.5	58.5
Equivalence ratio (ER)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
Staging height [m]	-	6.4	8.1	9.4	6.4
Staging ratio PA:SA:TA [%]	91:9:0	82:9:9	82:9:9	82:9:9	73:9:18
PA [m ³ /h]	67.3	61.9	61.9	62.5	55.1
SA [m ³ /h]	-	6.6	6.6	6.6	13.2
TA [m ³ /h]	-	6.6	6.6	6.6	13.2
Superficial velocity [m/s]	4.7	4.8	4.8	4.9	4.9
Loop-seal air [m ³ /h]	-	-	9.6	-	-
Bed temperature [°C]	843.0	848.4	848.2	862.0	872.4
O ₂ [vol.%] in flue gas	5.6	5.9	6.1	5.5	5.0
CO ₂ [vol.%] in flue gas	15.7	15.4	15.3	15.9	16.3
SO ₂ [ppm] in flue gas	0	0	0	0	0
CO [ppm] in flue gas	52.2	67.6	80.4	99.8	66.1
NO [ppm] in flue gas	148.8	120.0	117.6	100.7	90.8
N ₂ O [ppm] in flue gas	34.9	34.7	34.6	33.7	33.1
NO removal efficiency [%]	Base	19.4	21.0	32.3	39.0
CO increase rate [%]	Base	29.5	54.0	91.2	26.6

PA : Primary Air, SA : Secondary Air, TA : Tertiary Air

배기가스는 FGC에서 직접식 물 분사에 의해 수분 회수 및 탈황 과정을 거치고 유인송풍기(Induced draft fan; ID fan)에 의해 굴뚝(stack)으로 배출된다.

2-3. 실험조건 및 분석

본 연구의 목적인 air-staging을 통한 NO_x 저감 영향을 파악하기 위해 Table 2에 나타난 것과 같이, 5 가지 실험조건으로 미이용 산림 바이오매스의 순환유동층 연소 운전을 수행하였다.

Table 2에서 볼 수 있듯이, Run 1은 air-staging을 적용하지 않은 base 실험이다. Run 2-4는 air-staging 비율을 동일(PA:SA:TA=82%:9%:9%)하게 하고 3차 공기 공급 높이를 각각 6.4 m, 8.1 m, 9.4 m로 변화하여 최적 3차 공기 공급 높이를 도출하고자 하였다. 마지막으로, air-staging 비율에 대한 영향을 확인하고자, 3차 공기 공급 높이를 Run 2와 동일한 6.4 m에서 air-staging 비율을 PA:SA:TA=73%:9%:18%로 조절한 Run 5를 수행하였으며 그 결과는 air-staging을 하지 않은 Run 1과 PA:SA:TA=82%:9%:18%로 운전한 Run 2의 결과들과 비교하였다. 배기가스 성분분석을 위해 IR(AO2020, ABB, Germany)를 활용하여 O₂, CO₂ 농도 외 대기오염물질인 NO, CO, N₂O, SO₂ 농도를 실시간 측정하였으며 본 연구 결과로 제시한 배기가스 농도들은 모두 O₂ 6%로 보정하였다. 전체 운전(Run 1-5) 동안, 각 운전 조건들의 배기가스 농도가 일정해지는 것을 확인한 뒤 안정화 운전 중 수집된 데이터의 표준편차와 평균값을 제시하였다. 또한, 2차 cyclone과 bag-filter 하부에서 포집된 비산재들은 X-Ray Fluorescence (XRF(Epsilon 3XLE spectrometer, Malvern panalytical,UK)) 분석을 통해 주요 화합물들(SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, Fe₂O₃, CaO, K₂O, MgO, Na₂O)의 조성 비율을 이용하여 slagging index와 fouling index 결과를 도출하였다. 더불어, 비산재 내 미연탄소(UBC; Unburned carbon) 분석 및 배기가스 CO 농도를 이용하여 air-staging 적용 유무에 따른 연소효율을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Air-staging 적용 유무 영향

3-1-1. 온도/압력 프로파일

연소로 높이별 온도와 압력 프로파일은 연소 운전의 안정성을 확인할 수 있는 중요한 지표이다. 이에, NO_x 저감을 위해 적용된 air-staging 유무에 따른 온도 및 압력 프로파일을 분석하였으며 그 결과를 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이, air-staging 적용(Run 2) 시 연소로 4 m 부근까지의 온도가 air-staging을 적용하지 않은 실험(Run 1)보다 다소 증가되는 경향을 확인하였다. 이는 Run 2의 1차 공기 공급량이 61.9 m³/h로 Run 1의 67.3 m³/h에 비해 감소되면서 예열되지 않은 1차 공기의 공급량 감소로 인한 효과와 연소로 하부에서 열매체(hot-solid)들의 일부가 좀 더 체류되는 현상 때문으로 판단된다. 더불어, 연소로 3 m 지점에서 온도 감소가 일어나는 것이 나타나는데 이는 Table 1에서 확인할 수 있듯이, 연료 내 휘발분 함량이 74.0%로 매우 높아 연소로에 공급되는 순간 빠르게 연소되어 발열반응이 일어나고 이는 열매체인 유동사에 열을 제공하기 때문에 3 m 부근까지는 온도가 증가하나, 3 m 이상에서는 유동사에 열을 제공하는 발열반응이 부족하여 감소하게 된다. 또한, Run 2에서는 예열되지 않은 3차 공기를 6.4 m에서 6.6 m³/h로 공급하기 때문에 연소로 6 m 부

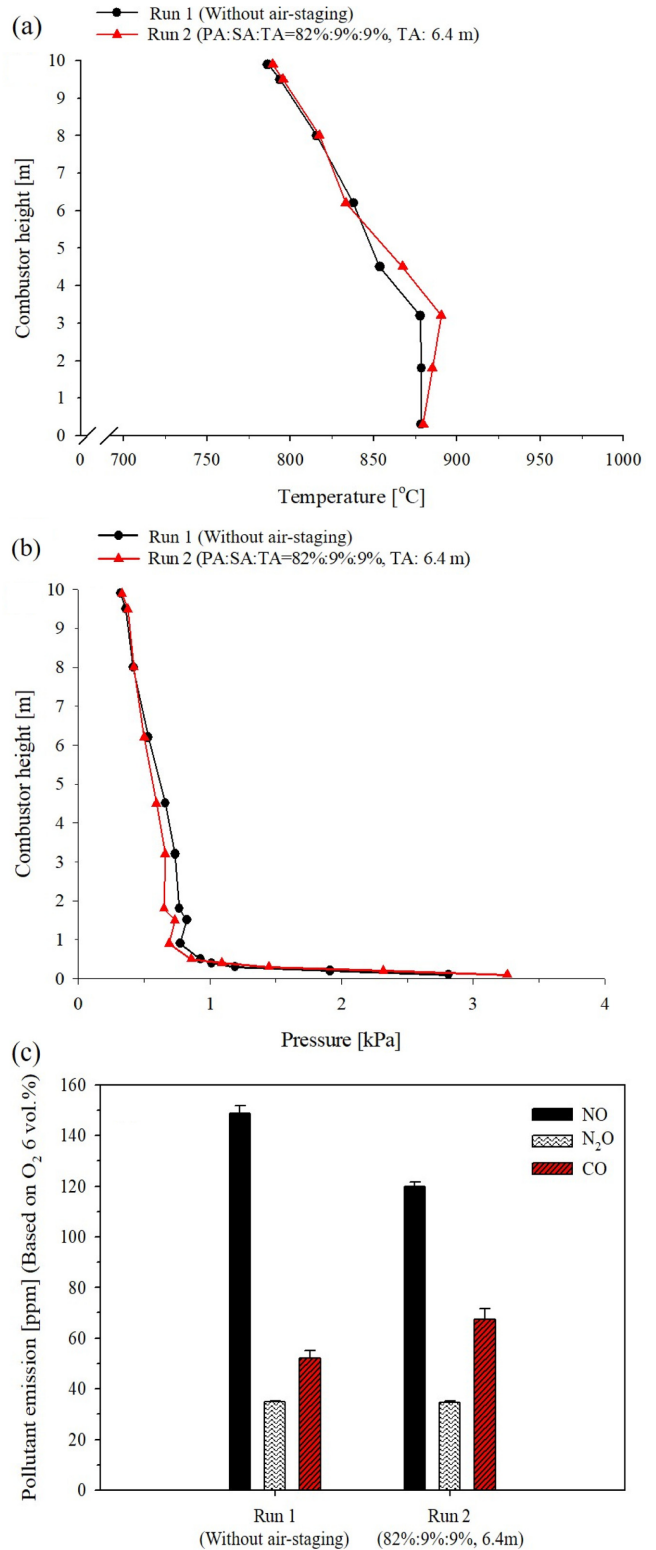


Fig. 3. Operating temperature (a) and pressure (b) profile at the height of the combustor and pollutants emission (c) with and without air-staging.

근에서의 냉각효과로 인해 Run 1보다 온도가 다소 감소되는 것을 확인하였다. Fig. 3(b)에 나타난 연소로 높이별 압력 프로파일 특성으로는 연소로 하부(0.4 m 이하)에서 Run 1에 비해 Run 2 운전 시 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 열매체들이 연소로 하부에서 체

류량이 증가되기 때문이며 0.5 m-6 m 부근에서는 고체 순환량이 적어져 Run 2의 압력 프로파일들이 Run 1에 비해 감소되는 것을 확인할 수 있었다[19]. 그럼에도 불구하고, 연소로 상부(6 m 이상)에서는 air-staging 적용 유무에 관계없이 일정한 압력 프로파일을 확인할 수 있는데 이는 연소로 운전 압력을 동일하게 유지하기 위해 공정 후단의 유인송풍기를 이용하여 연소로 상부 압력을 0.5 kPa(g)로 제어하기 때문이다.

3-1-2. 대기오염물질 배출 특성

순환유동층 연소에서는 일반적으로 연료 내 질소함량(Fuel-N)이 공급되는 산소량에 의해 연소 중 fuel-NO로 전환하게 되는데 이에 대한 NO 생성 및 N₂로의 환원 메커니즘은 Fig. 4에 제시하였다.

Fuel-N은 volatile-N과 char-N으로 구분되며 일반적으로 volatile-N는 HCN으로 빠르게 전환되고 나머지는 NH₃로 전환된다[3,20].

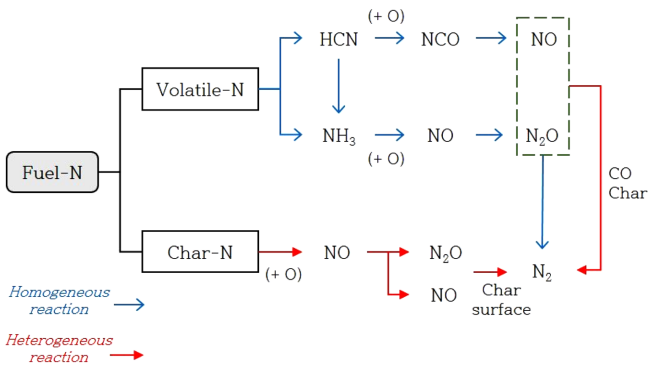


Fig. 4. The main reaction paths of NO_x mechanism in CFB [3,20].

HCN와 NH₃는 산화반응에 의해 NO, N₂O로 전환되며 이후 CO와 반응하여 N₂로 환원되는 homogeneous reaction이 주로 일어난다. 또한, char-N은 산화되어 NO를 생성하고 char 표면에서 heterogeneous reaction을 통해 N₂로 환원되어 감소한다[3].

Fig. 3(c)은 air-staging 적용 유무에 따른 대기오염물질별 농도를 나타내고 있다. Air-staging 적용(Run 2) 시, NO 농도는 120 ppm으로 Run 1의 148.8 ppm 보다 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Run 2의 1차 공기 공급량 감소로 인해 연소로 하부에서 연료가 풍부한 영역(fuel-rich zone) 즉, 환원영역의 형성에 의한 것으로 사료된다. 보다 자세한 이해를 위해 air-staging 적용 유무에 따른 연소로 내 NO 거동을 Fig. 5에 나타내었다[21,22].

먼저, air-staging 적용하지 않은 경우에는 연소로 내에 산화영역만 존재하지만, air-staging 적용 경우에는 3차 공기 공급 위치를 기준으로 아래쪽은 환원영역(Reduction zone), 위쪽은 산화영역(Oxidation zone)이 형성된다. 3차 공기 공급 위치가 높아질수록 환원영역이 확장됨에 따라 homogeneous reaction, heterogeneous reaction이 일어날 수 있는 반응 시간이 증가하여 NO가 N₂로 환원되는 반응이 지배적이게 된다. 더불어, air-staging 적용 시 1차 공기 공급량 감소로 인해 연소로 내 열매체가 체류하는 양이 많아짐에 따라 연소로를 떠나는 열매체 양은 상대적으로 적어지게 된다. 하지만, air-staging을 적용하지 않은 경우 대비 산화영역이 줄어들면서 미반응 char가 완전연소 될 수 있는 충분한 시간이 부족해짐에 따라 CO 농도는 증가하게 된다. 따라서 air-staging 운전 시 NO 농도는 감소하지만 CO 농도는 증가하는 경향이 본 연구에서 확인되었으며 NO와 CO 농도를 동시에 저감할 수 있는 최적 3차 공기 공급 위치와 적정 air-staging 비율을 도출하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

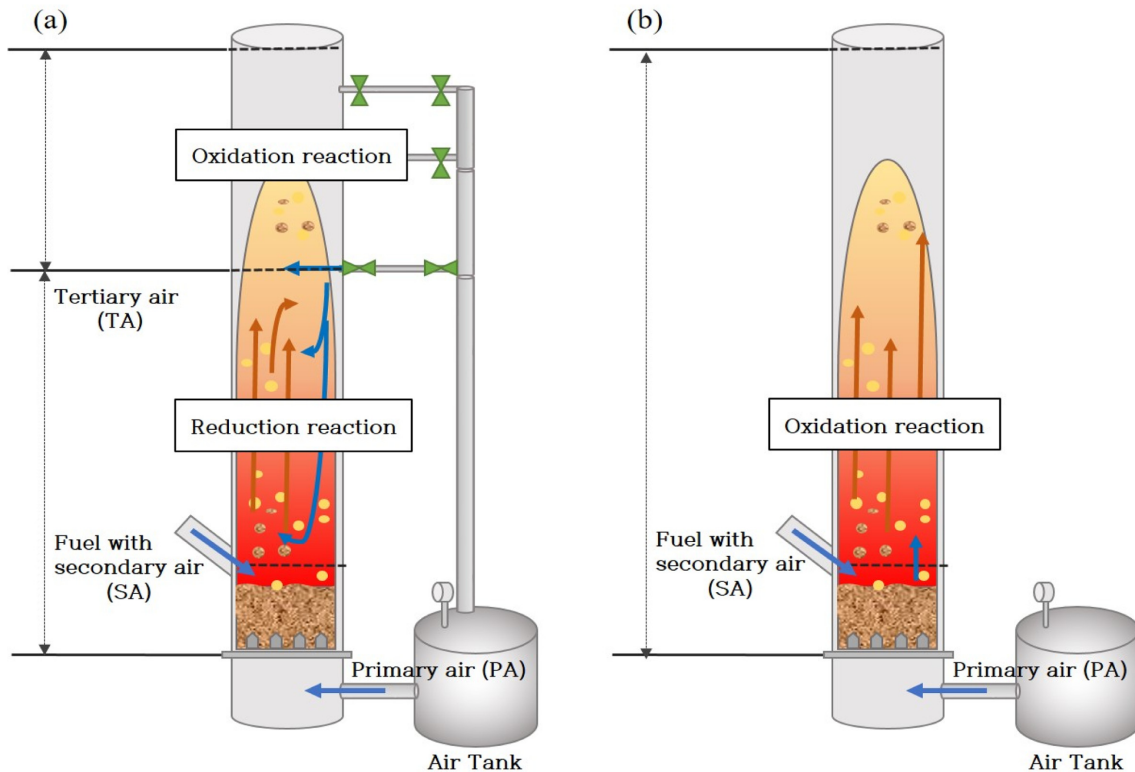


Fig. 5. Reduction and oxidation zone formation concept with (a) and without (b) air-staging [21,22].

3-2. 3차 공기(TA) 공급 높이 영향

3-2-1. 온도/압력 프로파일

3차 공기 공급 높이에 따른 연소로 내 온도와 압력 프로파일 및 대기오염물질 배출 특성을 확인하기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이, air-staging 비율(PA:SA:TA)을 82%:9%:9%로 동일하게 유지 하며 3차 공기 공급 위치를 6.4 m (Run 2), 8.1 m (Run 3), 9.4 m (Run 4) 로 변화하여 운전한 후 그 결과들을 비교하였다. 3차 공기 공급 높이 변화에 따른 연소로 내 온도와 압력 프로파일은 Fig. 6(a)와 (b)에 나타내었다.

Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, 연소로 높이별 온도 프로파일은 Run 4에서 가장 높은 경향을 나타내는데 이는 Run 2과 Run 3의 실험 조건들에 비해 좀 더 많은 연료가 투입되었기 때문이다. 더불어, 3차 공기 공급 높이 6.4 m 일 때(Run 2), 연소로 6 m 부근에서 가장 낮은 온도 경향을 보였으며 3차 공기 공급 높이 8.1 m 일 때(Run 3), 역시 다른 실험 조건들에 비해 8 m 부근에서 가장 낮은 온도 경향을 확인하였다. 이는 예열되지 않은 3차 공기 공급에 의한 냉각 효과이며 Saikaew T et al.의 연구에서도 동일한 결과들이 보고된 바 있다[23]. 3차 공기 공급 위치에 따른 연소로 높이별 압력 프로파일 특성으로는 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이, Run 2-4 모두 연소로 1 m 이상에서 비슷한 경향을 보이지만, 1 m 이하 구간에서는 Run 4의 압력 프로파일이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 Run 4의 연료투입량 및 1차 공기 공급량이 Run 2, 3 보다 다소 증가하여 미이용 산림 바이오매스 연소 시 생성되는 연소가스 증가에 의해 연소로 하부에 머무는 열매체의 양이 다소 감소하였기 때문으로 판단된다.

3-2-2. 대기오염물질 배출 특성

3차 공기 공급 높이에 따른 대기오염물질 배출 특성 결과는 Fig. 6(c)에 나타내었다. 3차 공기 공급 높이가 6.4 m에서 8.1 m, 9.4 m 로 증가될 때, NO 농도는 120.0 ppm에서 각각 117.6 ppm, 100.7 ppm으로 감소됨을 확인하였다. 이는 아래 heterogeneous reactions (1)-(2), homogeneous reaction (3)에 의한 NO 환원반응 때문이다 [24,25,26].

· Heterogeneous reaction



· Homogeneous reaction



Heterogeneous reaction (1),(2)은 char-N으로 생성된 NO가 char 표면 (2C_{fas})에서 촉매 작용을 통해 N₂로 환원되는 반응이며, homogeneous reaction (3)은 volatile-N에 의해 생성된 NO가 완전연소 되지 못한 CO와 반응하여 N₂로 환원되는 반응이다[3,25-27]. 3차 공기 공급 높이가 높아짐에 따라 연소로 내 환원영역의 증가로 인해 (1)-(3) 반응이 일어나는 영역이 확장되어 NO 농도가 저감되는 반면, CO 농도는 3차 공기 공급 위치가 6.4 m에서 9.4 m로 높아질수록 67.6 ppm에서 99.8 ppm로 증가되었다. 이는 Fig. 5에서 설명하였듯이, 미반응 char 및 CO가 CO₂로 전환되기 위한 산화영역의 감소 때문이다. 그러므로 3차 공기 공급 높이에 따른 운전결과로부터 NO와 CO 농도를 동시에 저감하기 위해서는 적절한 산화/환원영역이 존

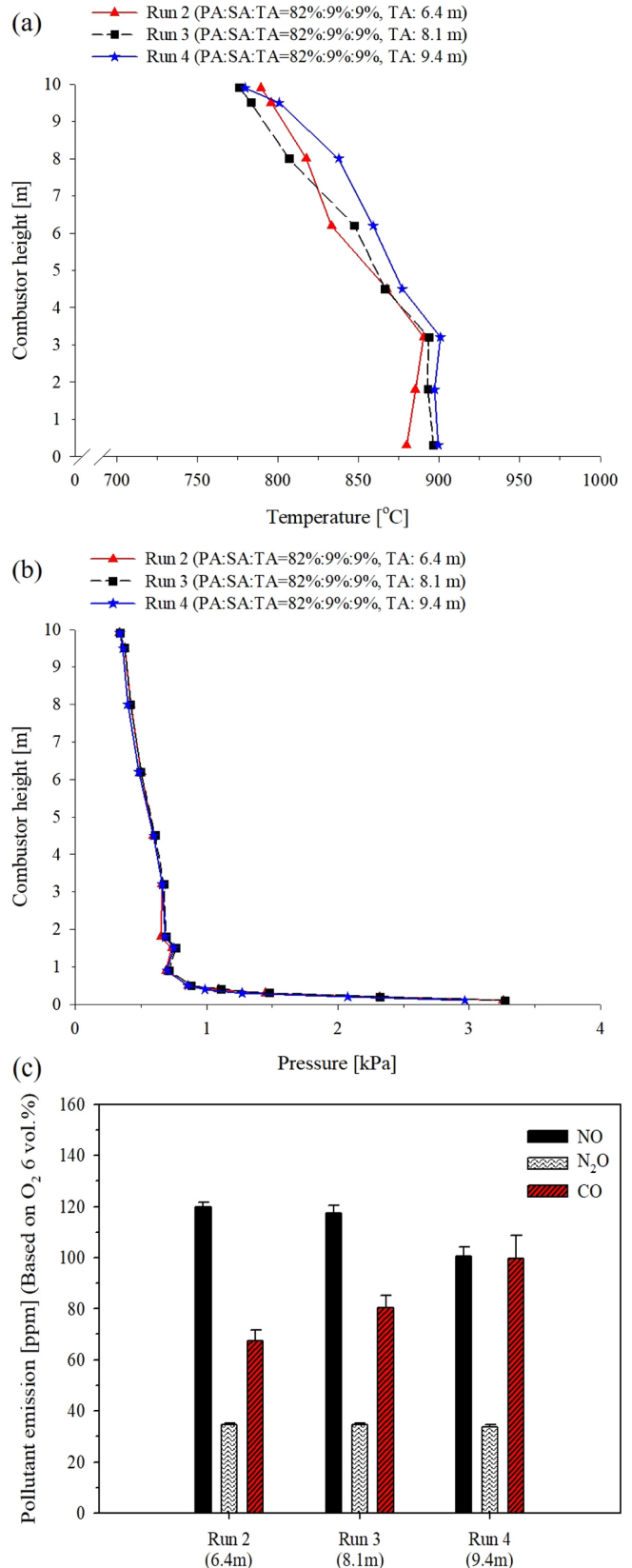


Fig. 6. Operating temperature (a) and pressure (b) profile at the height of the combustor and pollutants emission (c) according to different TA supply heights.

재하는 3차 공기 공급 위치를 6.4 m로 설정하고 air-staging 비율을 조절하는 것이 필요하다고 판단하였다.

3-3. Air-staging 비율 영향

3-3-1. 온도/압력 프로파일

Air-staging 비율에 대한 영향을 확인하기 위해 3차 공기 공급 높이는 6.4 m로 동일하게 하고 air-staging 비율을 PA:SA:TA=73%:9%:18%로 변화시킨 Run 5를 추가 실험하였다. Run 5의 1차 공기, 2차 공기, 3차 공기 공급량은 각각 55.1 m³/h, 6.6 m³/h, 13.2 m³/h였다. Run 5 운전 시 연소로 높이별 온도 및 압력 프로파일 결과들은 air-staging을 적용하지 않은 Run 1과 air-staging 비율을 PA:SA:TA=82%:9%:9%로 운전한 Run 2 결과들과 비교하였다.

Air-staging 비율에 대한 연소로 온도 및 압력 프로파일 변화는 1차 공기 공급량, 3차 공기 공급량, 연소로 하부에 체류하는 고체량(고체 체류량), 1차 공기 공급량에 의해 연소로를 순환하는 고체량(고체 순환량) 그리고 연소 시 발생하는 열을 제공받는 열매체제인 유동사(고체)량 등 매우 복합적으로 영향을 받는 것으로 사료된다. Fig. 7(a)로부터 3차 공기 공급량이 가장 많은 Run 5에서 연소로 하부 0.3 m 부근의 온도가 940 °C까지 상당히 증가되는 것을 확인하였다. 이는 1차 공기 공급량이 Run 1의 67.3 m³/h에서 Run 5의 55.1 m³/h로 낮아져 예열되지 않은 1차 공기의 공급량 감소로 인한 효과와 열매체의 체류량이 증가했기 때문으로 사료된다. 실제로 Run 1, 2, 5 운전 시, Fig. 2에 표시된 연소로 0.3 m 부근과 연소로 2.8 m 부근의 feeding line의 차압 변화를 확인한 결과 air-staging을 적용하지 않은 Run 1에서는 0.33 kPa인데 비해 air-staging 적용 시 Run 2와 Run 5에서의 각각 0.71과 0.53 kPa로 증가하는 것을 확인하였다. 이는 air-staging 적용 시 연소로 하부에 고체 체류량이 증가하는 것을 의미하며 연소로 전체적으로는 열매체제인 고체 순환량이 감소되어 결국 연소로 최상부와 하부 온도 차이는 증가하게 된다. Run 5의 경우, 예열되지 않은 1차 공기 공급량이 가장 적고 이에 의해 열매체제인 고체의 순환을 더디게 하여 연소로 상하부 온도차이가 약 130 °C(연소로 하부: 940 °C, 상부: 810 °C)로 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 하지만 air-staging을 적용한 Run 2의 경우, 연소로 상하부 온도 차이가 약 75 °C(연소로 하부: 875 °C, 상부: 800 °C) 정도로 air-staging을 적용하지 않은 Run 1과 비교 시 연소로 0.3 m 부근에서 동일하였으며, Run 5와 달리, 연소로 상하부 온도편차가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, Run 2 운전 시 0.3 m 부근까지 압력이 가장 높게 나타났는데 이는 Run 2 안정화 운전 전 Run 1에서 유실된 유동사를 연소로에 추가로 보충하였고 이들이 연소로 하부 온도를 제어하는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단되었다. 또한, Run 5의 경우 연료 투입 후 연소로 2 m 부근까지 온도가 감소되었는데 이 역시 부족한 1차 공기 공급량으로 Run 2에 비해 더욱 fuel-rich영역이 형성되기 때문이다. 연소로 2 m 이후에는 온도가 증가하고 3차 공기가 공급되는 6.4 m 부근부터 연소로 높이가 증가할수록 Run 5의 온도가 Run 2 온도보다 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 CO 및 미연탄소가 더 많은 공기와의 산화반응에 의한 것이다. Fig. 7(b)의 압력 프로파일에서는 air-staging 운전(Run 2, 5) 시 연소로 하부로 공급되는 1차 공기 공급량의 감소에도 불구하고 air-staging을 하지 않은 운전 조건(Run 1)보다 연소로 하부(0.3 m 미만)의 압력이 높은 것을 확인할 수 있는데 이 역시 연소로 하부에 고체 체류량 증가 때문이다. 더불어, 연소로 0.4 m 이상부터는 연소로 높이별로 Run 1에서 가장 높은 압력 프로파일을 나타냈는데 이는 1차 공기 공급량이 가장 많고 미이용 산립 바이오매스 연소 시 생성되는 연소가스 증가에 의해 열

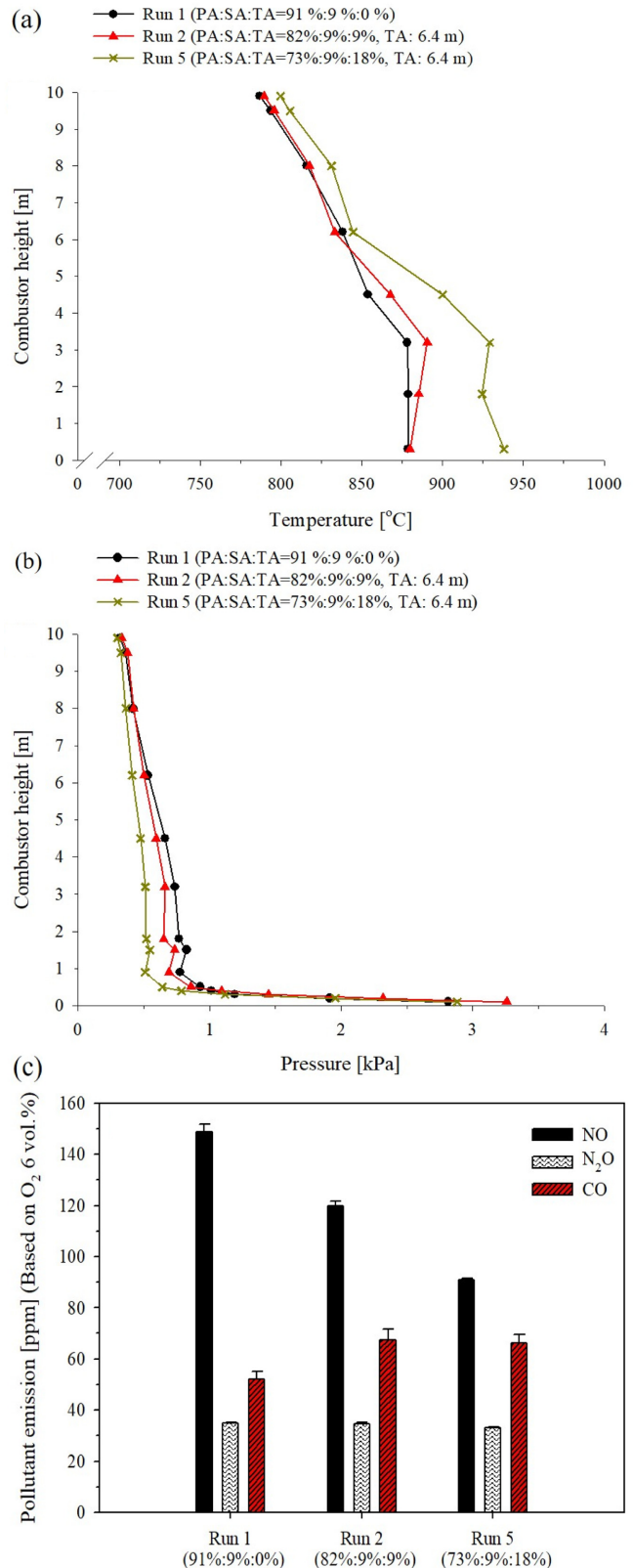


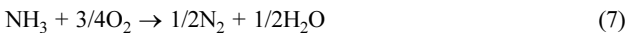
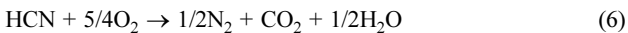
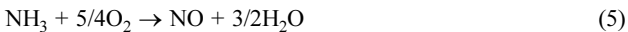
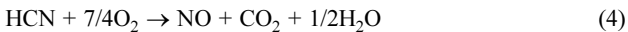
Fig. 7. Operating temperature (a) and pressure (b) profile at the height of the combustor and pollutants emission (c) with different air-staging ratios.

매체들의 고체 순환량이 증가하기 때문이다. 종합해보면, Run 5와 같이 예열되지 않은 1차 공기 공급량의 감소는 그 자체만으로도 연

소로 하부 온도를 높일 수 있는 원인이 될 뿐만 아니라, 연소 시 열을 제공받는 유동사의 순환을 더디게 하는 역할하기 때문에 연소로 높이에 따른 온도편차가 크게 발생하는 것으로 사료된다. 따라서, air-staging 연소 운전 시 연소로 하부 온도 제어가 매우 중요한 이슈임을 확인하였고 이를 위해서 충분한 유동사 공급(채류 및 순환)과 1차 공기 유량 감소에 대한 고체 순환량 감소를 줄이기 위해 배기가스 재순환과 연계하는 기술개발이 필요하다고 사료된다.

3-3-2. 대기오염물질 배출 특성

Air-staging 비율에 따른 대기오염물질 배출 특성 결과는 Fig. 7(c)에 나타내었다. 연료의 완전연소를 위해 필요한 공기량, 즉 공기비(Equivalence ratio, ER)를 1.3으로 일정하게 유지하며 air-staging 비율을 PA:SA:TA=91%:9%:0% (Run 1), 82%:9%:9% (Run 2)에서 73%:9%:18% (Run 5)로 변화할 때 NO 농도는 각각 148.8 ppm, 120.0 ppm, 90.8 ppm으로 감소하였으며 Run 1에 비해 39%의 NO 저감 효과를 확인하였다. Run 1에서는 완전연소에 필요한 공기를 1차 공기 91%와 2차 공기 9%로 공급하여 산화영역이 형성되며, NO 생성량은 공급되는 산소량이 가장 많은 영향을 받기 때문에 fuel-N이 다음 아래의 Eq. (4),(5)에 의해 NO로 전환되고 환원영역이 없어 Eq. (6)-(7)과 같은 N₂로의 전환이 어렵게 된다[28,29].



Run 5에서는 연소로 하부의 환원영역에서 발생된 다량의 CO 농도 및 char가 Eq. (1)-(3)에 의해 NO/CO 및 NO/char 반응들을 더욱 활발히 일어나게 할 수 있다[25]. 더불어, 6.4 m에서 3차 공기 공급량이 증가함에 따라 CO 농도를 완전 연소시킬 수 있는 공기량이 증가함으로써 Run 2 보다 낮은 CO 농도(66.1 ppm)가 배출되는 것을 확인하였다.

종합해보면, 앞서 언급한 3.1. air-staging 적용 유무에 따라, air-staging을 적용하게 되면 NO 농도는 감소하는 반면, CO 농도가 증가하는 것을 확인하였고 3.2. 3차 공기 공급 높이 영향에 따라, 가장 높은 9.4 m에서 3차 공기를 공급할 경우 NO 감소율은 가장 높지만 반대로 가장 높은 CO 농도가 배출되는 것을 확인하였다. 위

의 주요 결과들을 토대로 3차 공기 공급 위치를 6.4 m로 낮추고 air-staging 비율, 즉 1차 공기 공급량을 감소시키고, 3차 공기 공급량을 증가시킬 경우 NO 제거율은 Run 1(Base 실험) 대비 39% 증가하였고 CO 농도 증가율도 26.6%로 가장 적은 것을 확인하였다. 그 밖에, N₂O 농도는 일반적으로 NO 농도가 증가할 때 감소하는 경향을 보이는데[16,26], 본 연구결과에서 N₂O 농도는 air-staging 적용 유무, 3차 공기 공급 높이 및 투입량 비율 변화에 관계없이 33-34 ppm 수준임을 확인하였다. SO₂ 농도의 경우, 미이용 산림 바이오매스 내 황 함량이 Table 1에 나타낸 것처럼, 0.03 wt.% 수준으로 매우 적고 연소를 통해 생성된 SO₂ 함량은 연소로 후단 공정인 FGC에서 분사되는 물에 흡수되어 0 ppm으로 확인되었으며 FGC 수조 내 pH가 7에서 4.6~5.2로 감소되는 것을 확인하였다.

3-4. Ash 특성

바이오매스 순환유동층 연소에서는 운전 상태에 따라 ash와 관련된 많은 문제들 (bed agglomeration, slagging, fouling, clinker 등)이 야기되고 있으며 연소 공정의 운영비용을 줄이기 위해서는 이들을 해결하는 연구가 필요하다[30]. 본 연구에서는 air-staging 적용 유무에 따른 미이용 산림 바이오매스 순환유동층 연소에서 포집된 비산재들의 XRF 성분 분석을 통해 slagging 및 fouling 발생에 대한 간접적인 평가를 수행하였다. Table 3은 연료 ash와 Run 1과 5에서 실험 중 2차 cyclone과 bag-filter에서 회수된 비산재들의 주요 화합물들의 조성 비율을 나타냈으며 Eq. (8)-(10)을 이용하여 slagging index 및 fouling index를 계산[31,32]한 결과들을 Table 4에 제시하였다.

$$R_{B/A} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{TiO}_2) \quad (8)$$

$$R_s = R_{B/A} \times S_d \quad (9)$$

$$F_u = R_{B/A} \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (10)$$

여기서, R_{B/A}은 염기-산 산화물 지수, S_d는 연료의 황 함량(dry basis), R_s은 slagging index, F_u는 fouling index를 의미한다.

회재 성분들은 용점에 따라 두 가지로 분류할 수 있는데, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O는 낮은 용점을 가지고 있는 염기성 물질들로 이들은 slagging 및 fouling을 일으킬 가능성이 높다. 반면, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂는 산성 물질들로 상대적으로 높은 용점을 가지고 있다[31]. Table 3로부터, 연료 내 SiO₂ 함량은 30.4%인 반면, 2차 cyclone에서

Table 3. XRF components of ash in unused forest biomass and fly ash samples (wt.%)

Parameters	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Others	
Unused biomass	7.3	27.1	5.7	9.5	-	30.4	0.8	13.3	5.9	
Run 1	2 nd cyclone	7.8	19.4	3.9	7.0	0.7	40.9	0.8	14.1	5.3
	Bag-filter	13.2	25.2	5.5	4.6	0.7	25.3	0.9	13.0	11.6
Run 5	2 nd cyclone	7.9	21.5	4.2	7.3	0.3	38.6	0.8	13.4	6.0
	Bag-filter	12.3	25.0	5.0	4.8	0.2	26.7	1.0	13.2	12.0

Table 4. Slagging and fouling tendency

Parameters	B/A ratio	Slagging index	Fouling index
Run 1	2 nd cyclone	0.70	5.42
	Bag-filter	1.26	6.62
Run 5	2 nd cyclone	0.78	5.97
	Bag-filter	1.15	5.66
Evaluation	-	<0.6:Slight	0.6<Moderate ≤ 40

Table 5. Combustion efficiency by the application with and without air-staging

Parameters		Run 1	Run 5
UBC	\dot{m}_c [kg/h]	0.0071	0.0061
	2 nd cyclone		
	Bag-filter	0.1104	0.0357
CO	H_{CO_2} [kJ/kmol]		-393.52
	L_{UBC} [%]	1.72	0.65
	C_{CO} [ppm]	52.18	66.13
	H_{CO} [kJ/kmol]		-110.53
	$\dot{m}_{flue\ gas}$ [m ³ /h]	96.64	95.30
	L_{CO} [%]	0.03	0.04
Combustion efficiency [%]		98.3	99.3

회수된 회재 내 SiO₂는 air-staging 적용 유무에 관계없이 38.6% 이상 존재하는 것으로 확인되었는데 이는 연소로를 떠나 포집된 가벼운 유동사 입자들에 의한 것이다. Air-staging 적용 유무에 따른 Run 1과 5 모두에서 slagging index는 0.02~0.04로 매우 낮은 값을 보였는데 보통 slagging index가 0.6 미만일 경우 slagging 발생 가능성은 매우 낮음을 의미한다. 이는 미이용 산림 바이오매스 연료 내 낮은 황 함량뿐 아니라 비산재 내 높은 용점 성분들이 많기 때문이다. 하지만 fouling index의 경우, 두 조건 모두 5.42~6.62 수준임을 확인하였는데 이는 slight ($Fu \leq 0.6$)보다 심한 moderate 범위($0.6 < Fu \leq 40$) [32]에 해당하며 fouling을 줄이기 위해 연료 내 K와 Na 성분을 제거 혹은 포집할 수 있는 기술이 요구된다. 결론적으로 air-staging 적용 유무에 따른 회재 특성은 큰 차이가 없었으며, 연소로 하부영역의 온도만 적절히 제어한다면 연소로 내에서 NO 생성을 저감하기 위한 air-staging 연소 제어기술은 좋은 방안이 될 것으로 사료된다.

3-5. 연소효율

연소효율은 불완전연소에 의한 열손실을 고려하여 포집된 비산재 내 미연탄소(UBC; Unburned carbon)함량(L_{UBC})과 배기가스 내 CO(L_{CO}) 농도를 이용하여 다음 Eq. (11)-(13)에 의해 계산[33]되었으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

$$\eta(\%) = 100 - L_{UBC} - L_{CO} \quad (11)$$

각 열손실은 다음과 같은 식으로 계산되었다.

$$L_{UBC} = 100(\dot{m}_c/M_c)H_{CO_2}/(H_{fuel}\dot{m}_{fuel}) \quad (12)$$

$$L_{CO} = 100(C_{CO}\dot{m}_{flue\ gas})/22.4/10^6(H_{CO_2} - H_{CO})/(H_{fuel}\dot{m}_{fuel}) \quad (13)$$

Eq. (12)에서 L_{UBC} 는 미연탄소에 대한 열손실(%), \dot{m}_c 는 미연탄소 발생량(kg/h), M_c 는 탄소의 분자량(kg/mol), H_{CO_2} 는 CO₂의 반응 엔탈피(kJ/kmol)를 의미하며 H_{fuel} 는 연료의 고위발열량(kJ/kg), \dot{m}_{fuel} 은 연료 투입량(kg/h)이다. Eq. (13)에서 L_{CO} 는 CO 함량과 관련된 열손실(%), C_{CO} 는 배기가스 내 CO 농도(ppm), $\dot{m}_{flue\ gas}$ 는 배기가스 발생량(m³/h), H_{CO} 는 CO의 반응 엔탈피(kJ/kmol)를 의미한다. Air-staging을 적용하지 않은 운전(Run 1)과 NO와 CO 농도가 가장 낮았던 air-staging 운전(Run 5)에서의 연소효율을 비교한 결과, Run 5의 연소효율은 99.3%로 Run 1보다 1% 상승하는 것이 확인되었다. 이는 Table 5에서 확인할 수 있듯이, CO에 의한 열손실은 두 조건에서 각각 0.03% (Run 1)과 0.04% (Run 5)로 비슷하였지만, 미연탄소에 의한 열손실에서 Run 5에서 0.65%로 Run 1의 1.72%에 비해 크게 감소되기 때문이다. 이러한 미연탄소 열손실 감소 원인은 2차 cyclone과 bag-filter에서 포집되는 미연탄소가 포함된 비산재 발생량이 Run

1의 0.12 kg/h 비해 0.04 kg/h (Run 5)로 크게 줄어들었기 때문이다. 결국 air-staging 운전 시 1차 공기 공급량 감소는 2차 cyclone과 bag-filter로 이동할 수 있는 미연탄소가 포함된 비산재 배출량을 줄이는 역할을 하고 이는 미연탄소 열손실을 저감시켜 연소효율을 증가시키는 역할을 하는 것이다.

4. 결 론

질소산화물에 대한 대기배출부과금 제도에 대응할 수 있는 연소로 내 탈질을 위한 NO_x 저감 연구로서 미이용 산림 바이오매스 순환 유동층 연소에서 air-staging 적용 연구를 수행하였다.

(1) Air-staging 적용(PA:SA:TA=82%:9%:9%) 시, 3차 공기 공급 높이를 6.4 m에서 9.4 m로 높일수록 NO 농도는 120 ppm에서 100.7 ppm로 감소하지만 환원영역 증가에 의한 CO 농도는 연소로 내에서 완전히 연소되지 못하여 67.6 ppm에서 99.8 ppm 까지 증가하였다.

(2) NO 농도 저감을 위한 환원영역 및 CO 농도를 저감하기 위한 산화영역 즉, 반응 체류 시간 확보를 위해 3차 공기 공급 높이를 6.4 m로 유지하고 air-staging 비율을 (PA:SA:TA=73%:9%:18%)로 제어하면 NO 농도는 90.8 ppm으로 가장 낮았으며 CO 농도 역시 66.1 ppm으로 air-staging 적용 조건(Run2-5) 중 가장 감소되는 것을 확인하였다.

(3) Air-staging 적용 유무에 따른 회재 특성에서는 두 조건 모두 slagging 발생 가능성은 slight (slagging index < 0.6)인 반면, fouling 발생 가능성은 moderate (fouling index ≤ 40) 수준임을 확인하였다. 또한, 연소효율 측면에서는 air-staging 적용 시, 미연탄소에 의한 열손실 감소로 인해 연소효율은 99.3%로 air-staging을 적용하지 않은 조건 보다 1% 상승하는 효과를 확인하였다.

(4) 미이용 산림 바이오매스의 순환유동층 연소 시 air-staging 적용은 연료 내 질소함량(Fuel-N)을 N₂로 환원시킬 수 있는 분위기를 제공하여 로 내 탈질에 효과적이었다. 본 연구결과들은 유동층 보일러에서 air-staging 적용을 통한 NO_x 저감 방안에 대한 연소제어 지식으로서 활용이 가능할 것이다.

감 사

이 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('20005788').

References

- Barnes, I., "Operating Experience of Low Grade Fuels in Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Boilers," IEA Clean Coal Centre(2015).
- U.S. Environmental Protection Agency, "Nitrogen Oxides (NO_x) Why and How They are Controlled," EPA-456/F-99-006R(1999).
- Hill, S. C. and Douglas Smoot, L., "Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion Systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**, 417-458(2000).
- Easterly, J. L. and Burnham, M., "Overview of Biomass and Waste Fuel Resources for Power Production," *Biomass Bioenergy*, **10**, 79-92(1996).
- Ren, X., Sun, R., Meng, X., Vorobiev, N., Schiemann, M. and Levensis, Y. A., "Carbon, Sulfur and Nitrogen Oxide Emissions from Combustion of Pulverized Raw and Torrefied Biomass," *Fuel*, **188**, 310-323(2017).
- <http://www.forest.go.kr/kfswb/kfs/idx/Index.do>.
- <http://www.me.go.kr>.
- Mahmoudi, S., Baeyens, J. and Seville, J. P. K., "NO_x Formation and Selective Non-catalytic Reduction (SNCR) in a Fluidized Bed Combustor of Biomass," *Biomass and Bioenergy*, **34**(9), 1393-1409 (2010).
- Łaskawiec, K., Gębarowski, P. and Małolepszy, J., "Effect of De-NO_x Techniques Employed in Thermal Power Plants on Fly Ash Properties," *Acta Energetica*, **29**, 58-63(2016).
- IEA, Air Staging for NO_x Control (overfire air and two-stage combustion), (2018).
- Liu, H., Chaney, J., Li, J. and Sun, C., "Control of NO_x Emissions of a Domestic/small-scale Biomass Pellet Boiler by Air Staging," *Fuel*, **103**, 792-798(2013).
- Ke, X., Cai, R., Zhang, M., Miao, M., Lyu, J. and Yang, H., "Application of Ultra-low NO_x Emission Control for CFB Boilers Based on Theoretical Analysis and Industrial Practices," *Fuel Processing Technology*, **181**, 252-258(2018).
- Man, C. K., Gibbins, J. R., Witkamp, J. G. and Zhang, J., "Coal Characterization for NO_x Prediction in Air-staged Combustion of Pulverized Coals," *Fuel*, **84**, 2190-2195(2005).
- Basu, P., "Combustion of Coal in Circulating Fluidized-bed Boilers: A Review," *Chemical Engineering Science*, **54**(22), 5547-5557(1999).
- Reidick, A. and Kremer, H., "Pollutant Formation During Coal Combustion in a CFB Test Furnace," *Symposium (International) on Combustion*, **26**, 3309-3315(1996).
- de Diego, L. F., Londono, C. A., Wang, X. S. and Gibbs, B. M., "Influence of Operating Parameters on NO_x and N₂O Axial Profiles in a Circulating Fluidized Bed Combustor," *Fuel*, **75**, 971-978 (1996).
- Wang, X. S., Gibbs, B. M. and Rhodes, M. J., "Impact of Air Staging on the Fate of NO and N₂O in a Circulating Fluidized-bed Combustor," *Combustion and Flame*, **99**, 508-515(1994).
- Carroll, J. P., Finnan, J. M., Biedermann, F., Brunner, T. and Obernberger, I., "Air-staging to Reduce Emissions From Energy Crop Combustion in Small Scale Applications," *Fuel*, **155**, 37-43(2015).
- Edvardsson, E., Amand, L.-E., Thunman, H., Leckner, B., Johnsson, F., "Measuring the External Solids Flux in a CFB Boiler," *Proceedings 19th FBC Conference*, May 21-24, Vienna Austria, (2006).
- Winter, F., "Formation and Reduction of Pollutants in CFBC: From Heavy Metals, Particulates, Alkali, NO_x, N₂O, SO_x, HCl," *Proceedings of the 20th international conference on fluidized bed combustion*, Springer, 43-48(2010).
- Li, J., Zhang, X., Yang, W. and Blasiak, W., "Effects of Flue Gas Internal Recirculation on NO_x and SO_x Emissions in a Co-firing Boiler," *International Journal of Clean Coal and Energy*, **2**, 13-21(2013).
- Fan, W., Lin, Z., Kuang, J. and Li, Y., "Impact of Air Staging Along Furnace Height on NO_x Emissions from Pulverized Coal Combustion," *Fuel Processing Technology*, **91**, 625-634(2010).
- Saikaew, T., Supudommak, P., Mekasut, L., Piumsomboon, P. and Kuchonthara, P., "Emission of NO_x and N₂O from Co-combustion of Coal and Biomasses in CFB Combustor," *Greenhouse Gas Control*, **10**, 26-32(2012).
- Li, J. J., Zhang, M., Yang, H. R., Lu, J. F., Zhao, X. and Zhang, J. C., "The Theory and Practice of NO_x Emission Control for Circulating Fluidized Bed Boilers Based on the Re-specification of the Fluidization State," *Fuel Processing Technology*, **150**, 88-93(2016).
- Mingxin, X., Shiyuan, L., Wei, L. and Qinggang, L., "Effects of Gas Staging on the NO Emission during O₂/CO₂ Combustion with High Oxygen Concentration in Circulating Fluidized Bed," *Energy Fuels*, **29**(5), 3302-3311(2015).
- Zhou, H., Li, Y., Li, N., Qiu, R. C. and Cen, K., "Conversions of Fuel-N to NO and N₂O During Devolatilization and Char Combustion Stages of a Single Coal Particle Under Oxy-fuel Fluidized Bed Conditions," *Journal of the Energy Institute*, **92**, 351-363(2019).
- Kassman, H., Karlsson, M. and Amand, L.-E., "Influence of Air-staging on the Concentration Profiles of NH₃ and HCN in the Combustion Chamber of a CFB Boiler Burning Coal," *Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, May 16-19, Savannah Georgia(1999).
- Xiao, Y., Song, G., Song, W., Yang, W., Yang, Z. and Lyu, Q., "Influence of Feeding Position and Post-combustion Air Arrangement on NO_x Emission from Circulating Fluidized Bed Combustion with Post-combustion," *Fuel*, **269**, 117394(2020).
- Johnsson, J. E., "Formation and Reduction of Nitrogen Oxides in Fluidized-bed Combustion," *Fuel*, **73**, 1398-1415(1994).
- Arjunwadkar, A., Basu, P. and Acharya, B., "A Review of Some Operation and Maintenance Issues of CFBC Boilers," *Applied Therm Engineering*, **102**, 672-694(2016).
- Reza, M. T., Lynam, J. G., Uddin, H. and Coronella, C. J., "Hydrothermal Carbonization: Fate of Inorganics," *Biomass Bioenergy*, **49**, 86-94(2013).
- Pronobis, M., "Evaluation of the Influence of Biomass Co-combustion on Boiler Furnace Slagging by Means of Fusibility Correlations," *Biomass and Bioenergy*, **28**, 375-383(2005).
- Mun, T. Y., Tumsa, T. Z., Lee, U. D. and Yang, W., "Performance Evaluation of Co-firing Various Kinds of Biomass with Low Rank Coals in a 500 MW_e Coal-fired Power Plant," *Energy*, **115**, 954-962(2016).