

100 kW_{th} 급 순환유동층 시스템에서 무연탄 순산소연소 특성 연구

문지홍*** · 조성호*** · 문태영***† · 박성진*** · 김재영*** · Nguyen Hoang Khoi**** · 이재구*****†

*한국에너지기술연구원 FEP 융합연구단

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

**한국에너지기술연구원 기후변화연구본부

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

***군산대학교 화학공학과

54151 전라북도 군산시 대학로 558

****과학기술연합대학원대학교 신에너지 및 시스템공학

34129 대전광역시 유성구 가정로 152

(2019년 2월 13일 접수, 2019년 3월 18일 수정본 접수, 2019년 3월 22일 채택)

Oxy Combustion Characteristics of Anthracite in a 100 kW_{th} Circulating Fluidized Bed System

Ji-Hong Moon***, Sung-Ho Jo***, Tae-Young Mun***†, Sung-Jin Park****, Jae-Young Kim***,
Nguyen Hoang Khoi**** and Jae-Goo Lee*****†

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

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

***Chemical Engineering Department, Kunsan National University, 558, Daehak-ro, Kunsan-si, Jeonbuk, 54154, Korea

****Advanced Energy and System Engineering, University of Science and Technology, 152, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34129 Korea

(Received 13 February 2019; Received in revised form 18 March 2019; accepted 22 March 2019)

요 약

순산소 순환유동층 연소기술은 기후변화 및 연료 수급 문제들을 해결할 수 있는 기술로 주목 받고 있다. 순산소 순환유동층 연소기술은 배기가스 재순환 공정을 통해 이산화탄소를 비교적 쉽게 포집할 수 있으며 대기오염물질 배출도 줄일 수 있는 친환경 연소기술이다. 새롭게 개발된 100 kW_{th} 급 순산소 순환유동층 연소 시스템은 연료다변화에 대응하기 위해 다양한 연료들의 순산소연소 특성을 분석하고 있으며, 본 연구에서는 높은 고정탄소 및 회분함량으로 인해 연소성이 낮은 연료로 알려진 무연탄을 활용하여 높은 이산화탄소를 생산하고 연소효율을 향상시키고자 하였다. 그 결과로서, 무연탄 순산소연소는 아역청탄 공기연소 대비, 연소효율이 2% 향상되었으며 대기오염물질인 SO₂, CO, NO는 각각 15%, 60%, 99% 감소하였다. 또한, 안정적인 순산소 순환유동층 연소를 통해 배기가스 내 94 vol.% 이상의 CO₂가 포집될 수 있음을 확인하였다.

Abstract – Oxy-combustion with a circulating fluidized bed (Oxy-CFBC) technology has been paid attention to cope with the climate change and fuel supply problem. In addition, Oxy-CFBC technology as one of the methods for carbon dioxide capture is an eco-friendly that can reduce air pollutants, such as SO₂, NO and CO through a flue gas recirculation process. The newly developed 100 kW_{th} pilot-scale Oxy-CFBC system used for this research has been continuously utilizing to investigate oxy-combustion characteristics for various fuels, coals and biomasses to verify the possibility of fuel diversification. The anthracite is known as a low reactivity fuel due to a lot of fixed carbon and ash. Therefore, this study aims not only to improve combustion efficiency of an anthracite, but also to capture carbon dioxide. As a result, compared to air-combustion of sub-bituminous coal, oxy-combustion of anthracite could improve 2% combustion efficiency and emissions of SO₂, CO and NO were reduced 15%, 60% and 99%, respectively. In addition, stable operating of Oxy-CFBC could capture above 94 vol.% CO₂.

Key words: Oxy combustion, Circulating fluidized bed, Anthracite, CO₂ capture, Air pollutants

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mty1980@kier.re.kr, jaegoo@kier.re.kr

‡이 논문은 충남대학교 강용 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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

석탄 화력 발전에서 연소 방식은 일반적으로 미분탄 연소(pulverized coal combustion, PCC)와 순환유동층 연소(circulating fluidized bed combustion, CFBC) 기술이 사용되고 있다. 미분탄 연소 대비 순환유동층 연소의 장점은 낮은 조업온도로 인한 적은 열적 질소산화물(thermal NO_x) 생성, 연소로 내에서 석회석(limestone) 투입에 의한 탈황(de-SO_x) 및 저급 연료 활용이 가능한 연료다변화(fuel flexibility)이다[1]. 특히, 순환유동층 연소로에서 회분함량이 많은 연료 연소 시, 900 °C 이하의 비교적 낮은 조업온도로 인하여 회분 용융(ash melting) 및 슬래깅(slagging) 문제로부터 미분탄 연소보다 유리하며, 무연탄(anthracite)과 같은 고정탄소 함량이 많은 연료 연소 시, 연소로 내에서의 긴 체류시간에 의해 미분탄 연소에 비해 연소효율을 높일 수 있다[2]. 이러한 장점으로 인하여 순환유동층 보일러가 증가하고 있으며, 2016년 기준 전 세계 90 GW_e 해당되는 3,000기 이상의 순환유동층 보일러가 상업운전이 되고 있고 이 중 300 MW_e 급 발전 플랜트는 100기 이상이다[3].

국내 화력발전소에서 사용하는 연료는 주로 역청탄과 아역청탄으로 전량 수입에 의존하고 있으며 한반도 지역에 존재하는 무연탄은 연소 반응성이 낮은 이산화탄소 포집 및 저장(CCS; carbon capture and storage) 기술 중 경제성과 효율이 가장 높은 기술이면서 기존 발전설비에 적용이 가장 쉬운 기술로 평가받고 있다[6-9]. 이러한 순산소연소 기술은 공기에서 N₂가 분리된 O₂와 재순환된 배기가스를 혼합하여 산화제(대부분 CO₂+O₂)로 이용한다. 이로 인해 약 79 dry vol.% 정도 N₂가 포함되는 공기연소 배기가스와 달리 순산소연소 공정에서는 N₂가 사전에 분리되어 배출량이 79% 가량 감소된 고순도의 CO₂로 이루어진 배기가스가 배출되어 CO₂ 저장 및 이용이 용이해진다[10]. 또한 산화제로 O₂+N₂ 대신 O₂+CO₂가 투입되는 조건이기 때문에 thermal NO_x 및 prompt NO_x

생성반응이 억제되고, NO는 fuel-N으로부터만 생성된다[11]. 이와 같은 특성으로, 순산소연소 기술은 온실가스와 대기오염물질 및 미세먼지를 감소시킬 수 있는 청정화력 기술로 평가받고 있다[12-14].

순산소연소 공정은 미분탄 보일러를 개조하는 목적으로 시작되었지만, 최근 연료다변화가 가능한 순환유동층 보일러의 장점이 부각되면서 Oxy-CFBC 공정에 대한 관심도 높아지고 있다[15]. Oxy-CFBC는 순환유동층 보일러의 장점과 더불어, 배기가스 재순환 비율 감소 및 순산소 함량을 증가시켜 배기가스 재순환 팬의 동력 및 보일러의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 미분탄 순산소 연소(Oxy-PC)를 포함하는 다른 순산소연소 공정에서는 화염온도의 상승 때문에 순산소 함량을 30% 이상 높이기 어렵지만, Oxy-CFBC 공정은 외부열교환기 등을 이용하여 열전달 역할을 하는 유동매체의 온도제어가 가능하기 때문에 산소 함량을 이론상 70%까지 높일 수 있다[16-18]. Oxy-CFBC 연구는 주로 pilot scale에서 기술개발이 국외에서 진행되고 있으나 국내에서는 기초연구 단계에 머물러 있다[19,20]. 따라서 본 연구는 100 kW_{th} 급 순환유동층 연소시스템에서 무연탄 순산소연소 시 연소로 내 온도, 압력 분포 및 배기가스 내 대기오염물질(SO₂, NO, CO), 연소효율 등을 확인하고 무연탄 Oxy-CFBC 중 CO₂ 원천분리가 안정적으로 유지되는지 확인하였다. 본 연구로부터 얻어진 운전결과들은 기후변화 대응 및 대기오염 물질 배출 저감을 위한 국내 무연탄 Oxy-CFBC 개발에 중요한 자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 실 험

2-1. 연료 및 유동사

본 연구에서 사용된 연료들의 공업분석, 원소분석, 발열량분석 결과는 다음 Table 1에 나타내었다. 아역청탄과 무연탄의 연료특성 비교 시 휘발분, 고정탄소, 회분, 탄소, 수소 및 산소함량 등 대부분 항목에서 매우 상반되는 것을 확인하였으며 무연탄의 높은 회분함량에도 불구하고, 낮은 산소함량과 높은 고정탄소 함량으로 인해 저위발열량이 아역청탄보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 실험을 위해 사용된 연료들은 원탄을 파쇄 후 10 mm 이하의 입자들을 사용하였다. Fig. 1은 아역청탄, 무연탄 및 유동사의 입도분포를 나타내었으며, 평균입도는 각각 1.518 mm, 3.195 mm, 0.348 mm이다.

2-2. Oxy-CFBC 시스템

본 연구의 Oxy-CFBC 시스템 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 연료

Table 1. Properties of coals

| Proximate analysis (wt.%, ar) | Sub-bituminous coal | Anthracite |
|-------------------------------|---------------------|------------|
| Moisture | 26.2 | 13.4 |
| Volatile matter | 36.9 | 3.2 |
| Fixed carbon | 35.1 | 65.6 |
| Ash | 1.8 | 17.8 |
| Ultimate analysis (wt.%, daf) | | |
| Carbon | 74.0 | 92.1 |
| Hydrogen | 5.0 | 2.2 |
| Oxygen | 19.9 | 3.4 |
| Nitrogen | 1.0 | 1.5 |
| Sulfur | 0.1 | 0.8 |
| Lower heating value (kcal/kg) | 4,481 | 5,400 |

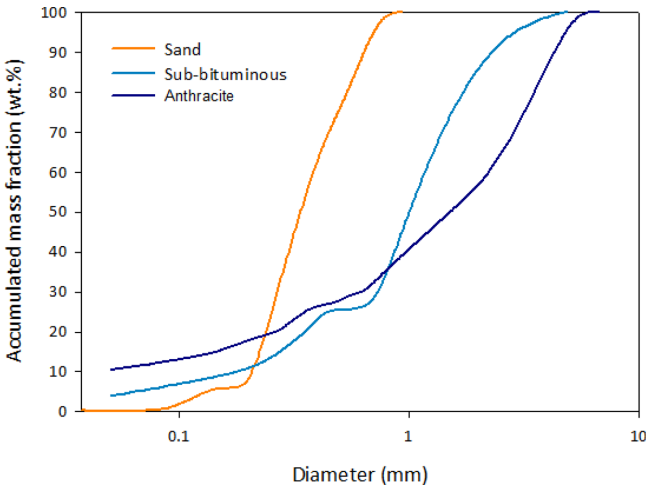


Fig. 1. Particle size distribution (PSD) of coals and silica sand.

및 유동사는 각 스크류 피더들에 의해 순환유동층 연소로 하부로 정량 공급되었다. 순환유동층 연소로 즉 연소반응이 일어나는 riser의 직경과 높이는 각각 0.15 m와 10 m이며 hot solid가 순환되는 영역인 riser, 기고분리기의 cyclones(1차, 2차), 고체순환설비인 loop-seal은 열팽창에 의한 설비손상을 방지하기 위해 각 내부에 0.1 m 두께로 내화재 처리를 하였다. 생성되는 배기가스 내 미세입자를 포집하기 위해서 백필터(bag-filter)를 사용하였으며 백필터 운전 온도(250 °C 이하)를 위해 1차 열교환기(Shell and tube type)가 설치되어 있다. 미세입자 집진 후 2차 열교환기를 통과한 배기가스는 응축설비(FGC; flue gas condenser)를 통해 배기가스 내 수분이 회수되었다.

운전 초기 연소로 예열을 위해 LNG 버너를 이용하여 dense bed 영역을 500 °C 정도로 승온 시킨 후 LNG 공급을 중단하고 석탄을 공급하여 800 °C 정도까지 승온시키며 공기연소 운전을 하였다. 공기연소에서 순산소연소로 전환은 단시간 내 안정적으로 이루어져야 한다. 본 설비에서는 배기가스 재순환(FGR; flue gas recirculation) 팬에 의해 배기가스가 mixing tank로 유입되고 이 때 O₂는 MFC(mass flow controller)에 의해 mixing tank로 정량 공급하여 배기가스와 O₂가 혼합된 산화제가 riser(primary oxidant), feeding line(secondary oxidant), loop-seal로 각각 공급되어 Oxy-CFBC 운전을 실시하였다. 즉 하나의 재순환 팬으로 각 산화제들을 공급하기 때문에 공기에서 순산소연소로 전환이 수 초 내에 이루어진다. Mixing tank 내 산화제의 O₂, CO₂, N₂ 농도들과 연소가스 내 O₂, CO₂, N₂, SO₂, NO, CO 농도들을 실시간 분석하기 위해 IR(AO2020, ABB, Germany)과 GC-TCD(GC 7890, Agilent, USA, thermal conductivity detector)를 이용하여 분석하였다.

2-3. 실험 조건

공기연소 및 순산소연소의 주요 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 두 연소 조건의 hydrodynamics를 최대한 동일하게 운전하기 위해 산화제(oxidant) 양을 조절하였으며, superficial velocity는 5.5~6.0 m/s로 운전되었다. 또한, 두 연소조건에서의 공급된 열량(thermal input)은 공기연소 시 65.6 kW, 순산소연소 시 92.7 kW이다. 순산소연소 조건에서 공급된 열량이 높은 이유는 순산소연소 산화제의 산소 함량이 28.2 vol.%로, 공기연소에 비해 동일한 유속 및 산화제 비율 조건에서 투입되는 연료 양이 많아지기 때문이다. Oxy-CFBC 운전조건에서 배기가스 재순환 비율은 80% 수준을 유지하였다. 대

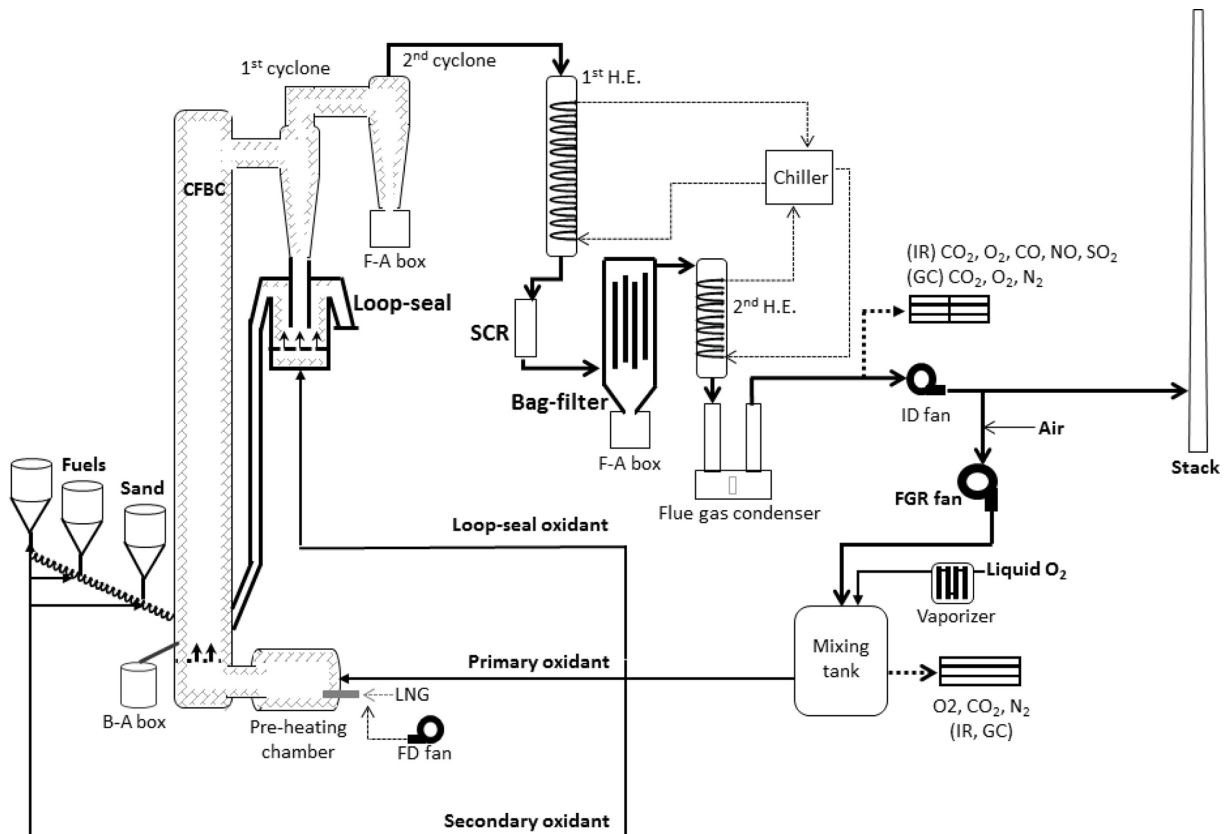


Fig. 2. Schematic diagram of a pilot-scale oxy-CFBC system.

Table 2. Main operating conditions

| Operating mode | Air combustion | Oxy combustion |
|---|---------------------|----------------|
| Fuel | Sub-bituminous coal | Anthracite |
| Operating time (h) | 4.0 | 3.0 |
| Average riser temperature (°C) | 750 | 847 |
| Fuel feeding rate (kg/h) | 12.6 | 14.7 |
| Thermal input (kW) | 65.6 | 92.7 |
| O ₂ concentration in oxidant (vol.%) | 20.9 | 28.2 |
| Primary oxidant (m ³ /h) | 85.5 | 90.2 |
| Secondary oxidant (m ³ /h) | 7.2 | 7.2 |
| Loop-seal oxidant (m ³ /h) | 7.2 | 7.2 |
| Superficial velocity (m/s) | 5.5 | 6.0 |

기오염물질 및 연소효율을 위한 실험결과들은 두 연소조건에서 안정화된 운전시간에서의 평균값을 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 순환유동층 운전 특성

Fig. 3과 Fig. 4에 순환유동층 연소로의 운전 압력 및 온도 특성을 나타내었다. 기존 연구에서 공기 및 순산소연소 운전조건에 따른 운전 압력 및 온도의 차이는 크지 않았다[20]. 본 연구에서는 이와 대조적으로 공기 및 순산소연소 조건에 따라 경향이 달라지는 점은 연료에 의한 효과가 가장 크다고 볼 수 있다. 무연탄 순산소연소 시 연소로 하부 압력이 상대적으로 높음에도 불구하고 연소로 1.8 m 상단부터는 압력이 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 회재와 고정탄소 함량이 매우 높은 무연탄의 특성상 연소로 하부에 회재가 쌓이면서 연소로 하부 압력이 높아진 것이다. 이로 인해 유동사 공급에 제한이 생겨 고체순환량이 적어지면서 연소로 상부 압력이 낮아진 것이다. 또한 순산소연소 시 배기가스 재순환 공정에 의해 배출가스의 양과 후단 압력의 감소가 연소로 상부 압력을 해소시키는 효과도 작용된 것이다. 본 연구에서는 공기 유입을 최소화시키기 위해 연소로 상부 압력은 500~600 Pa(g)로 유지하였고, 연소로 하부 wind-box 압력은 팬 부하를 최소화시키기 위해 5000 Pa(g) 이하로

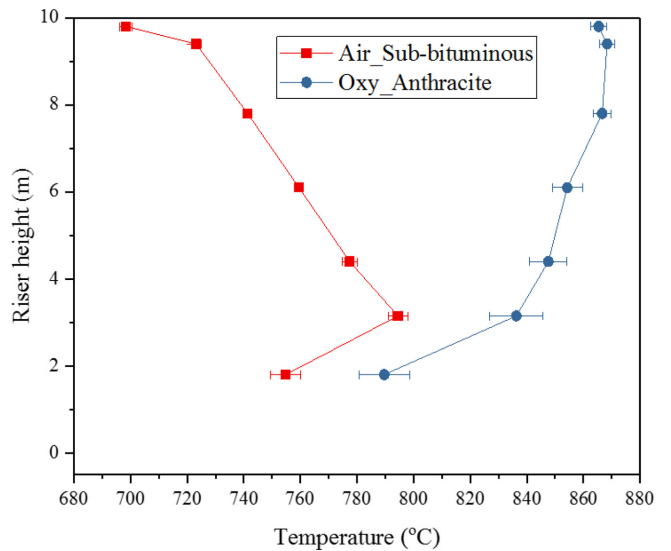


Fig. 4. Operating temperature profile on the riser height.

유지하였다. 더불어, 연소로 온도 분포 역시 연료에 따라 상반된 경향을 보이고 있다. 무연탄의 경우 고체순환량이 적고 CO의 발생량이 많기 때문에 연소로 상부에서 후연소가 일어나는 것을 볼 수 있다. 상기 순환유동층 운전 온도 및 압력 특성으로 보아 원활한 순환유동층 운전을 위해서는 특히 무연탄의 경우 연소로 하부에서 회재의 주기적인 배출이 필요하다. 또한 연소 반응성 확보를 위해서는 무연탄 입도를 줄이는 것이 유리하지만 입도가 너무 작을 경우 연소로에서 비산되는 입자가 많아져서 연소효율을 저하시키는 문제도 발생하므로 적절한 입도를 선정하는 것이 중요하다[21-23].

3-2. CO₂ 순도

순산소연소 공정에서 배기가스 중 CO₂ 순도는 연소 후단 공정인 CO₂ 고순도화, 포집 및 이용 공정 성능에 밀접한 영향을 미치는 주요 인자이다[24,25]. CO₂ 순도를 증가시키기 위해서는 공정 내 공기 유입과 연소가스 내 산소농도를 최소화시켜야 한다. 하지만 연소반응시 과잉산소가 10% 이하일 경우 불완전연소가 일어날 가능성이 높기 때문에 본 연구에서는 과잉산소를 15~20%로 조절하여 연소가스 산소농도를 3.5~4.0 vol.% 내외로 유지하였다[26]. 따라서 공기 유입이 최소화되어 이론적으로 도달할 수 있는 CO₂ 최대 순도는 약 96.5 vol.%이며, FGC 후단에서 IR과 GC로 측정된 연소가스 실시간 조성을 Fig. 5에 나타내었다. 무연탄 순산소연소 시 평균 CO₂

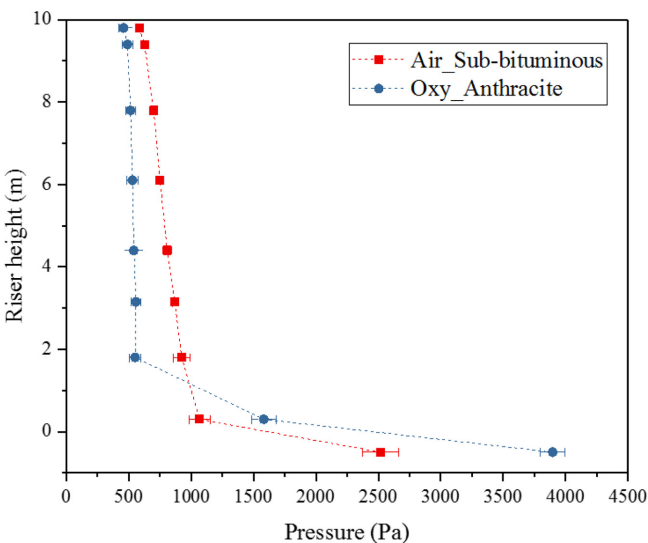


Fig. 3. Operating pressure profile on the riser height.

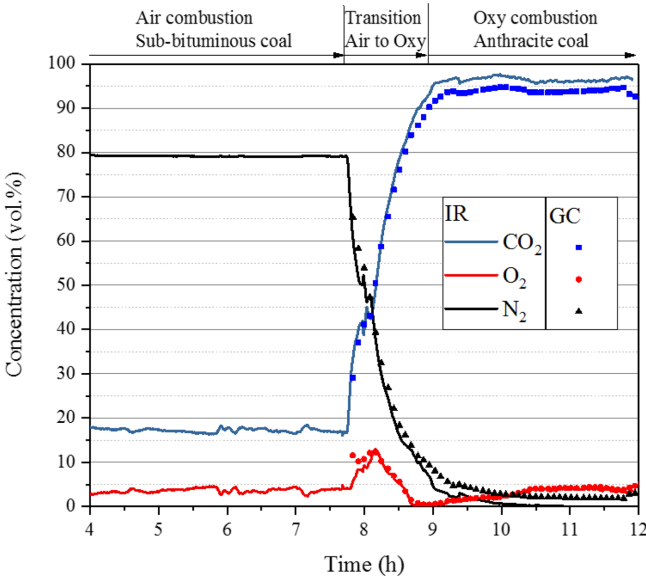


Fig. 5. Overall CO₂ and O₂ concentrations in flue gas.

순도는 IR에서 96.1 vol.%, GC에서 94.7 vol.%로 이론적 최대 순도에 근접한 결과로 공기 유입이 거의 없었다는 것을 보여주고 있다.

순산소연소 공정에서는 배기가스 재순환 기술을 이용하기 때문에 연소가스의 조성 변화가 직접적으로 산화제의 조성에 영향을 미친다. 따라서 상기 언급하였던 과잉산소를 일정하게 유지할 수 있도록 연소가스 조성을 일정하게 유지시키며 운전하는 기술이 중요하다. 본 연구에서는 연소가스의 조성변화 정도를 알아보기 위해 표준편차 분석기법을 이용하였다. 아역청탄 공기연소 시 연소가스 CO₂ 표준편차는 0.45 vol.%, 순산소연소 시 0.96 vol.% 이었는데 비해, 무연탄 순산소연소 실험 시 연소가스 CO₂ 표준편차는 0.18 vol.%로 아역청탄에 비해 상당히 안정적으로 운전이 되었음을 알 수 있다. 이는 휘발분이 적고 고정탄소가 많은 무연탄의 연료 특성 상, 휘발분이 많은 아역청탄에 비해 연소가스 조성 변화가 적었음을 의미한다.

3-3. 대기오염물질 배출 특성

Fig. 6은 FGC 후단에서 측정된 대기오염물질(SO₂, NO, CO)들의 실시간 배출 농도를 보여준다. 공기연소 구간에서 황 함량이 낮고 Ca 성분이 비교적 높은 아역청탄(Ca/S ratio=5.06)의 특성상 아래와 같은 자가 탈황 반응으로 인해 SO₂ 농도는 평균 10 ppm으로 낮은 수치를 보였다.



황 함량이 아역청탄의 6배 정도 높은 무연탄(Ca/S ratio=1.75)의 순산소연소 구간에서 SO₂ 농도는 평균 106 ppm으로 검출되었다. CO 농도도 SO₂와 비슷한 경향을 보이고 있어 고정탄소 함량이 높은 무연탄의 특성으로 불완전연소가 일어난 것으로 분석된다[27]. 즉, O₂ 분압이 낮은 조건으로 자가 탈황 반응이 약해지면서 SO₂ 농도가 높아진 것으로 판단된다. 또한 CO₂ 분압이 높은 순산소연소 조건에서는 아래와 같은 Boudouard 반응에 의해 CO가 생성되어 공기연소에 비해 CO 농도가 다소 증가한다[20,28-31].

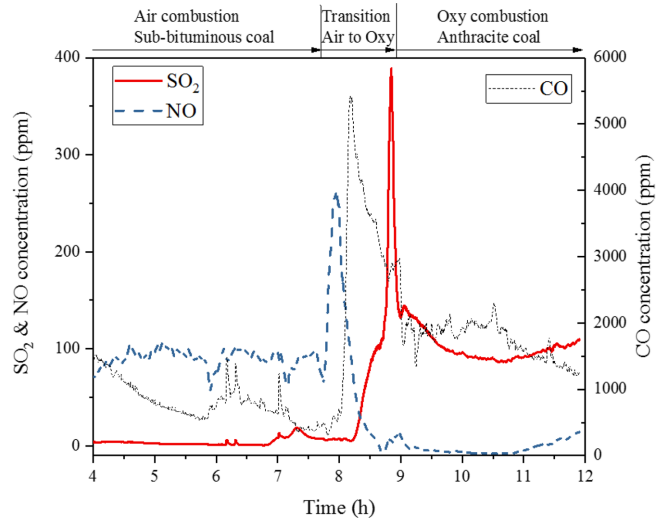
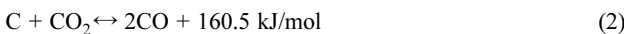


Fig. 6. Overall emission concentrations (6% O₂) in flue gas.

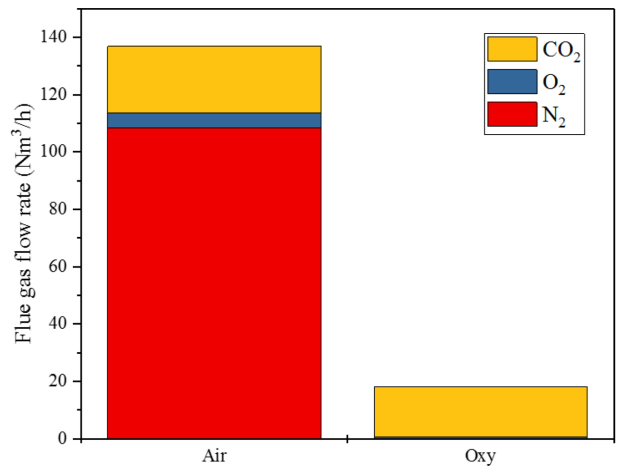


Fig. 7. Comparison of flue gas flow rates in air and oxy combustion.

NO는 이와 반대의 경향을 보이며 질소 함량이 더 높은 무연탄의 순산소연소 구간에서 거의 검출되지 않았다. 이는 O₂ 분압이 낮은 조건에서 아래와 같은 NO 생성반응들이 약해진 것으로 보인다 [32]. 또한 N₂ 분압이 높은 공기연소 조건에 비해 순산소연소 조건에서는 N₂가 거의 없는 CO₂ 분위기이므로 fuel-NO_x만 생성된다.

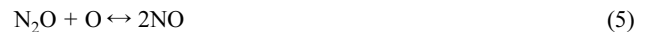


Fig. 7은 공기연소와 순산소연소 시 배출되는 배기가스량을 stack 전단에서 측정하여 비교한 결과로, 순산소연소의 장점을 잘 보여주고 있다. 순산소연소 시 질소 성분의 원천분리와 배기가스 재순환 공정에 의해 배기가스량은 공기연소에 비해 20% 이하 수준으로 감축되고 대부분 CO₂로 구성되어 있음을 보여준다. 이로 인해 배출되는 배기가스를 직접적으로 CO₂ 이용 공정에 적용시킬 수 있다는 장점이 있다. Fig. 8은 공기연소와 순산소연소 시 배출되는 대기오염물질들의 양을 비교한 결과로, 무연탄 순산소연소 시 아역청탄에 비해 황 및 질소 함량이 많음에도 불구하고 동일한 투입 열량 대비

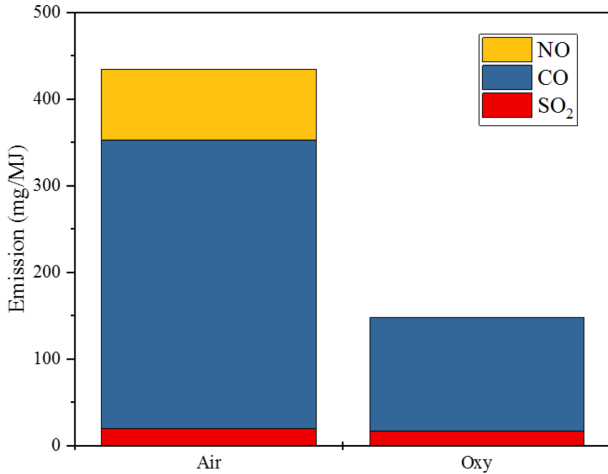


Fig. 8. Comparison of air pollutants in air and oxy combustion.

배출량이 SO₂ 15%, CO 60%, NO 99% 이상 저감되는 것을 보여 준다. 이러한 결과는 배기가스 재순환 공정에 의한 감축 효과가 크다고 볼 수 있다. 본 결과는 정확한 비교를 위해 탈질, 탈황 설비를 가동하지 않은 결과이며, 연소가스의 수분 제거를 위해 응축설비(FGC)만 가동된 결과로서, 수분에 의해 SO₂가 흡수되지만 아역청탄의 공기연소 및 무연탄의 순산소 연소에서 동일하게 FGC가 가동되었다. 동일한 연료를 사용해서 비교해보면 순산소연소 시 각 대기오염물질들이 80% 이상 저감되는 것을 기존 연구에서 확인한 바 있다[20].

3-4. 연소효율

연소효율은 불완전연소에 의한 열손실, 즉 CO와 미연탄소(UBC; unburned carbon)의 발생량에 의해 결정된다[33]. 이와 더불어 본 연구에서는 미연분과 회분 및 배기가스에 의한 열손실을 연소효율에 포함하였다. 이러한 가정에 의거하여 연소효율은 다음과 같은 식으로 정의된다[34].

$$\eta = 1 - (Q_{UBC} + Q_{ash} + Q_{CO} + Q_{exhaust\ gas}) / LHV_{coal} \quad (6)$$

각 열손실을 산정하는 식을 대입하여 연소효율은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\eta = 1 - (\dot{m}_{net}X_kH_c + \dot{m}_{ash}C_pT_p + \dot{n}_{CO}H_{CO} + \dot{n}_{CO}C_{p,g}(T-T_0)) / \dot{m}_fLHV_{coal} \quad (7)$$

첫 번째 항목인 미연탄소에 의한 열손실은 연소로에서 배출되는 고체 양 \dot{m}_{net} (kg/h), 탄소 함유율 X_k , 탄소의 반응엔탈피 H_c 로 산출된다[35]. 두 번째 항목인 회분에 의한 열손실은 연소로에서 배출되는 회분의 양 \dot{m}_{ash} (kg/h), 회분의 비열 C_p (kJ/kg·K), 배출온도 T_p 로 산출된다. 세 번째 항목인 불완전연소에 의한 열손실은 배기가스 유량 \dot{n} (Nm³/h), CO의 분율 y_{CO} , CO의 반응엔탈피 H_{CO} (kJ/kmol)로 산출된다. 네 번째 항목인 배기가스에 의한 열손실은 유량과 배기가스의 비열 $C_{p,g}$ (kJ/kmol·K), 배출온도와 대기온도의 차이(T-T₀)로 산출된다. 2차 열교환기 및 FGC를 통과한 배기가스는 30 °C 이하로 배출되지만 FGC에서 배기가스를 응축시키는 에너지는 열손실로 간주해야 됨으로, 본 연구에서는 FGC 전단의 온도를 고려하여 T-T₀를 50 K로 산정하였다. \dot{m}_f (kg/h)는 석탄의 투입 유량, LHV_{coal} 은 석탄의 저위발열량(lower heating value)이다.

상기 식에 의해 산출된 연소효율을 Table 3에 나타내었다. 무연탄의 순산소연소 효율은 97.6%로 아역청탄 공기연소에 비해 2% 정도 향상되는 결과를 보였다. 무연탄의 경우 아역청탄에 비해 미연탄소와 회분에 의한 열손실이 상대적으로 많았음에도 불구하고 배기가스에 의한 열손실이 상당량 감소되었음을 볼 수 있다. 이는 순산소연소 공정의 장점을 잘 보여주고 있으며, 배기가스 재순환 공정에 의해 연소효율을 2% 이상 향상시킬 수 있다는 것을 보여준다.

실제 상용급 순환유동층 보일러에서 배기가스 배출온도는 140 °C 이상으로, 배기가스에 의한 열손실이 상당하다. 따라서 상용급 보일러를 순산소연소 공정으로 개조할 경우 본 연구결과보다 연소효율이 더 향상될 것으로 분석된다. 다만, FGC에서의 열손실을 감안해야 하며 FGC를 사용하지 않는 wet-FGR 공정을 적용할 경우, 열손실은 7% 이상 감소될 것으로 분석되나 수분에 따른 연소효율 저

Table 3. Combustion efficiency in accordance with heat loss terms

| Operating mode (Fuel) | | Air combustion (Sub-bituminous) | Oxy combustion (Anthracite) |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Combustion efficiency (%) | | 95.6 | 97.6 |
| UBC | Heat loss (MJ/h) | 0.27 | 2.68 |
| | \dot{m}_{net} (kg/h) | 0.58 | 3.03 |
| | X_k | 0.016 | 0.03 |
| | H_c (MJ/kg) | 29.5 | 29.5 |
| Ash | Heat loss (MJ/h) | 0.13 | 3.54 |
| | \dot{m}_{ash} (kg/h) | 0.23 | 3.03 |
| | C_p (kJ/kg·K) | 1.09 | 1.09 |
| | T_p (K) | 511.15 | 1073.15 |
| CO | Heat loss (MJ/h) | 0.73 | 0.41 |
| | \dot{n} (Nm ³ /h) | 137 | 18 |
| | y_{CO} | 0.000460 | 0.001937 |
| | H_{CO} (MJ/Nm ³) | 11.58 | 11.58 |
| Exhaust gas | Heat loss (MJ/h) | 9.32 | 1.49 |
| | \dot{n} (Nm ³ /h) | 137 | 18 |
| | $C_{p,g}$ (kJ/kmol·K) | 30.47 | 36.77 |
| | $T-T_0$ (K) | 50 | 50 |
| Thermal input [MJ/h] | | 236 | 334 |

하를 고려해야 한다. 본 연구결과와 기존 연구결과를 종합하여 공기연소에 비해 순산소연소 공정에서의 연소효율 특성은 다음과 같다. 배기가스 재순환 공정에 의해 배출가스의 열손실이 상당히 감소되며, 불완전연소에 의해 생성된 CO의 약 80%는 재순환되어 다시 연소시킬 수 있다. 미연탄소는 순산소 함량이 증가함에 따라 감소되는 경향을 보이며, ash 배출에 의한 열손실은 큰 차이가 없었다.

4. 결 론

100 kW_{th} 급 순환유동층 연소시스템에서 온실가스 감축과 연료 다변화를 위한 연구의 일환으로 무연탄 순산소연소 실험을 수행하였다. 연소 반응성이 낮은 무연탄의 경우 기존 공기연소 방식에서는 연소효율이 낮아 활용하기 어려웠지만, 본 연구에서의 Oxy-CFBC 기술을 활용하면 연소효율이 97.6%로 아역청탄 공기연소 대비 2% 가량 효율 향상을 시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 배기가스의 CO₂ 순도는 94.7~96.1 vol.%로 온실가스 포집 및 이용 기술에 적용이 가능할 것으로 보인다. 대기오염물질 배출량도 아역청탄 공기연소에 비해 SO₂ 15%, CO 60%, NO 99% 이상 저감되는 결과를 보여주어 미세먼지 배출 감축에도 상당한 효과를 보일 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 국가과학기술연구회의 “조정정·고효율 연료다변화형 미래에너지 생산기술 개발” 과제로 수행되었음(No. CRC-15-07-KIER).

References

- Barnes, I., “Operating Experience of Low Grade Fuels in Circulating Fluidized Bed Combustion (CFBC) Boilers,” IEA Clean Coal Centre(2015).
- Lockwood, T., “Techno-economic Analysis of PC Versus CFB Combustion Technology,” IEA Clean Coal Centre, CCC/226 ISBN 978-92-9029-546-4(2013).
- Cai, R., Ke, X., Lyu, J., Yang, H., Zhang, M., Yue, G. and Ling, W., “Progress of Circulating Fluidized Bed Combustion Technology in China: a Review,” *Clean Energy*, **1**, 36-49(2017).
- Lee, J.-M., Kim, D.-W., Kim, J.-S., Na, J.-G. and Lee, S.-H., “Co-combustion of Refuse Derived Fuel With Korean Anthracite in a Commercial Circulation Fluidized Bed Boiler,” *Energy*, **35**, 2814-2818(2010).
- Kim, D. W., Lee, J. M., Kim, J. S. and Kim, J. J., “Co-combustion of Korean Anthracite with Bituminous Coal in Two Circulating Fluidized Bed Combustors,” *Korean J. Chem. Eng.*, **24**, 461-465 (2007).
- Gonzalez-Salazar, M. A., “Recent Developments in Carbon Dioxide Capture Technologies for Gas Turbine Power Generation,” *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **34**, 106-116(2015).
- López, R., Menéndez, M., Fernández, C. and Bernardo-Sánchez, A., “The Effects of Scale-up and Coal-biomass Blending on Supercritical Coal Oxy-combustion Power Plants,” *Energy*, **148**, 571-584(2018).
- Hnydiuk-Stefan, A. and Składzień, J., “Analysis of Supercritical Coal Fired Oxy Combustion Power Plant with Cryogenic Oxygen Unit and Turbo-compressor,” *Energy*, **128**, 271-283(2017).
- Habib, M. A., Nemitalah, M. A. and Ben-Mansour, R., “Recent Development in Oxy-combustion Technology and its Applications to Gas Turbine Combustors and ITM Reactors,” *Energy and Fuels*, **27**, 2-19(2013).
- Weng, M., Gunther, C. and Kather, A., “Flue Gas Concentrations and Efficiencies of a Coal-fired Oxy Fuel Power Plant with Circulating Fluidised Bed Combustion,” *Energy Procedia*, **37**, 1480-1489(2013).
- Hu, Y. Q., Kobayashi, N. and Hasatani, M., “The Reduction of Recycled-NO_x in Coal Combustion with O₂/recycled Flue Gas Under Low Recycling Ratio,” *Fuel*, **80**(13), 1851-1855(2001).
- Duan, L., Zhao, C., Zhou, W., Qu, C. and Chen, X., “O₂/CO₂ Coal Combustion Characteristics in a 50 kW_{th} Circulating Fluidized Bed,” *Int. J. Greenh. Gas Con.*, **5**(4), 770-776(2011).
- Lasek, J. A., Janusz, M., Zuwała, J., Glód, K. and Iluk, A., “Oxy-fuel Combustion of Selected Solid Fuels Under Atmospheric and Elevated Pressures,” *Energy*, **62**, 105-112(2013).
- Riaza, J., Gil, M. V., Álvarez, L., Pevida, C., Pis, J. J. and Rubiera, F., “Oxy-fuel Combustion of Coal and Biomass Blends,” *Energy*, **41**(1), 429-435(2012).
- Supranov, V. M., Ryabov, G. A. and Mel’Nikov, D. A., “Studying the Possibility and Advisability of Using a Circulating Fluidized-bed Boiler in the Oxyfuel Combustion Mode,” *Therm. Eng. (English translation of Teploenergetika)*, **58**, 593-601(2011).
- Li, H., Li, S., Ren, Q., Li, W., Xu, M., Liu, J. Z. and Lu, Q., “Experimental Results for Oxy-fuel Combustion with High Oxygen Concentration in a 1 MW_{th} Pilot-scale Circulating Fluidized Bed,” *Energy Procedia*, **63**, 362-371(2014).
- Silvestre, L. S., Nsakala, N. and Scott, L. D., “Alstom Oxyfuel CFB Boilers: a Promising Option for CO₂ Capture,” *Energy Procedia*, **1**, 543-548(2009).
- Leckner, B. and Gómez-Barea, A., “Oxy-fuel Combustion in Circulating Fluidized Bed Boilers,” *Applied Energy*, **125**, 308-318(2014).
- Mathekga, H. I., Oboirien, B. O. and North, B. C., “A Review of Oxy-fuel Combustion in Fluidized Bed Reactors,” *Int. J. Energy Res.*, **40**, 878-902(2016).
- Moon, J. H., Jo, S. H., Park, S. J., Khoi, N. H., Seo, M. W., Ra, H. W., Yoon, S. J., Yoon, S. M., Lee, J. G. and Mun, T. Y., “Carbon Dioxide Purity and Combustion Characteristics of Oxy Firing Compared to Air Firing in a Pilot-scale Circulating Fluidized Bed,” *Energy*, **166**, 183-192(2019).
- Won, Y. S., Jeong, A. R., Choi, J. H., Jo, S. H., Ryu, H. J. and Yi, C. K., “Temperature Effects on Riser Pressure Drop in a Circulating Fluidized Bed,” *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(3), 913-920(2017).
- Han, K. H., Hyun, J. S., Choi, W. K. and Lee, J. S., “A Study of co-combustion Characteristics of North Korean Anthracite and Bituminous Coal in 2 MWe CFBC Power Plant,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **47**(5), 580-586(2009).
- Lee, S. H., Lee, J. M., Kim, J. S., Choi, J. H. and Kim, S. D., “Combustion Characteristics of Anthracite Coal in the D CFB Boiler,” *Korean J. Chem. Eng.*, **38**(4), 516-522(2000).
- Ziębik, A. and Gładysz, P., “Thermoecological Analysis of An Oxy-fuel Combustion Power Plant Integrated with a CO₂ Processing Unit,” *Energy*, **88**, 37-45(2015).

25. Jin, B., Zhao, H. and Zheng, C., "Optimization and Control for CO₂ Compression and Purification Unit in Oxy-combustion Power Plants," *Energy*, **83**, 416-430(2015).
26. Shun, D. W., Bae, D. H., Han, K. H., Son, J. E., Kang, Y., Wee, Y. H., Lee, J. S. and Ji, P. S., "Circulating Fluidized Bed Combustion of Korean Anthracite," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(3), 321-326(1996).
27. Lee, J. M., Kim, J. S. and Lee, E. M., "Characteristics of co-combustion of Korean Anthracite with Bituminous Coal in a Circulating Fluidized Bed," *J. Korean Soc. Combust.*, **10**(3), 1-9 (2005).
28. Al-Makhadmeh, L., "Coal Pyrolysis and Char Combustion Under Oxy-fuel Conditions," Ph.D. thesis, University of Stuttgart, Shaker Verlag Aachen(2009).
29. Wall, T. F., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R., et al., "An Overview on Oxyfuel Coal Combustion-state of the Art Research and Technology Development," *Chem. Eng. Res. Des.*, **87**, 1003-1016(2009).
30. Seddighi, S., "Design of Large Scale Oxy-fuel Fluidized Bed Boilers: Constant Thermal Power and Constant Furnace Size Scenarios," *Energy*, **118**, 1286-1294(2017).
31. Li, Y. H., Chen, G. B., Wu, F. H., Hsieh, H. F. and Chao, Y. C., "Effects of Carbon Dioxide in Oxyfuel Atmosphere on Catalytic Combustion in a Small-scale Channel," *Energy*, **94**, 766-774(2016).
32. Winter, F., Wartha, C., Löffler, G. and Hofbauer, H., "The NO and N₂O Formation Mechanism During Devolatilization and Char Combustion Under Fluidized-bed Conditions," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, **26**(2), 3325-3334(1996).
33. Basu, P., Cen, K. F. and Jestin, L., "Boilers and Burners," New York, Springer(2000).
34. Gungor, A., "Analysis of Combustion Efficiency in CFB Coal Combustors," *Fuel*, **87**, 1083-1095(2008).
35. Gyl'maliev, A. M. and Shpirt, M. Y., "Calculation of the Enthalpy of Formation of Coal Organic Matter," *Solid Fuel Chem.*, **42**(5), 263-267(2008).