

0.1 MW_{th} 급 순환유동층에서의 무연탄 연소 전산유체역학 모사

고은솔* · 국진우*** · 서광원*** · 서수빈** · 김형우* · 강서영** · 이시훈*†

*전북대학교 환경에너지융합학과
 54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567
 **전북대학교 자원에너지공학과
 54896 전라북도 전주시 덕진구 백제대로 567
 ***경원테크
 13497 경기도 성남시 분당구 야탑로81번길 10

(2021년 3월 26일 접수, 2021년 5월 11일 수정본 접수, 2021년 5월 12일 채택)

Anthracite Oxygen Combustion Simulation in 0.1MW_{th} Circulating Fluidized Bed

Eun Sol Go*, Jin Woo Kook***, Kwang Won Seo***, Su Been Seo**, Hyung Woo Kim**,
 Seo Yeong Kang* and See Hoon Lee*†

*Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Jeonju-si, jeollabuk-do, 54896, Korea
 **Department of Mineral Resources Energy Engineering, Jeonbuk national university, 567, Baekje-daero, Jeonju-si, jeollabuk-do, 54896, Korea
 ***KW Tech, Yatap-ro 81beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13497, Korea
 (Received 26 March 2021; Received in revised 11 May 2021; Accepted 12 May 2021)

요 약

낮은 반응성으로 인해 복잡한 공정이 필요한 무연탄은 순환유동층 내의 동적 거동을 통해 연소 특성이 고찰되어야 한다. Pilot 규모의 0.1MW_{th} 급 순산소 순환유동층 연소로에서의 무연탄 연소 특성을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 전산유체해석 기법을 이용하였다. 순산소 순환유동층 보일러는 연소로(0.15 m I.D., 10 m High), 싸이클론, 재순환부 등으로 구성되었고 동일한 크기의 3D 모델 반응기를 구축하였다. 실험에 사용한 무연탄은 평균 입도 1,070 µm, 밀도 2,326 kg/m³이다. 공기 연소에서 순산소 연소로의 연소 환경 변화에 따른 반응기 내부의 기-고 흐름 패턴을 고찰하였다. 이때, 공기 연소와 순산소 연소에서 온도 분포는 비슷한 양상을 보이지만 압력 분포는 순산소 연소에서 더 낮음을 알 수 있었다. 더불어 공기 연소에 비해 순산소 연소에서 더 높은 CO₂ 농도를 가지므로 이산화탄소 포집이 활발히 이루어질 것을 예상해 볼 수 있다. 결과적으로 본 연구를 통해 무연탄 활용 시 순환유동층 반응기의 최적화된 설계 및 운전에 기여할 수 있음을 확인하였다.

Abstract – The combustion characteristics of anthracite, which follow a complex process with low reactivity, must be considered through the dynamic behavior of circulating fluidized bed (CFB) boilers. In this study, computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed to analyze the combustion characteristics of anthracite in a pilot scale 0.1 MW_{th} Oxy-fuel circulating fluidized bed (Oxy-CFB) boiler. The 0.1MW_{th} Oxy-CFB boiler is composed of combustor (0.15 m I.D., 10 m High), cyclone, return leg, and so on. To perform CFD analysis, a 3D simulation model reactor was designed and used. The anthracite used in the experiment has an average particle size of 1,070 µm and a density of 2,326 kg/m³. The flow pattern of gas-solids inside the reactor according to the change of combustion environment from air combustion to oxygen combustion was investigated. At this time, it was found that the temperature distribution in air combustion and oxygen combustion showed a similar pattern, but the pressure distribution was lower in oxygen combustion. addition, since it has a higher CO₂ concentration in oxygen combustion than in air combustion, it can be expected that carbon dioxide capture will take place actively. As a result, it was confirmed that this study can contribute to the optimized design and operation of a circulating fluidized bed reactor using anthracite.

Key words: Anthracite, Circulating fluidized bed, Air combustion, Oxy combustion, Simulation

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: donald@jbnu.ac.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.

1. 서 론

현대 사회에 있어서 전기는 에너지의 가장 유용한 형태로, 2040년의 세계 전력 수요는 2012년 대비 69% 증가할 것으로 예측되고 있다. 지속적인 전력 수요의 증가는 온실가스 배출량 증가로 이어지며, 온실가스의 주된 원인인 CO₂는 전체 배출량의 65%를 차지한다. 탄소 규제를 위한 화석연료의 효율적인 활용과 CO₂ 포집 및 저장은 온실가스 배출량을 줄이는데 중요한 역할을 한다[1-4]. 따라서 석탄 연소로 인한 온실가스의 배출을 저감시키기 위해 순환유동층 보일러에 순산소 연소 기술을 접목한 순산소 순환유동층 보일러(oxy-CFB)에 대한 연구 및 상용화가 활발해지고 있다[5-9].

순산소 연소 기술은 기존의 석탄 화력 발전소에 적용할 수 있어 다른 CO₂ 포집 기술보다도 많은 이점을 가지고 있다. 연도 가스의 재순환을 통해 공정 장비 및 CO₂ 포집 비용을 줄이기 때문에 경제적이다. 고순도의 이산화탄소를 쉽게 분리하고 포집할 수 있다. 순산소 순환유동층 보일러는 순수한 산소만을 이용하며, 공기 분리기 장치(ASU)를 사용하여 산소와 질소를 분리한다. 순산소 연소는 연소 전에 질소가 분리되어 낮은 온도에서 연소가 진행되기 때문에 열적 질소산화물(thermal NO_x) 생성이 적다. 추가적인 탈황공정을 위한 시설 없이도 로내 탈황이 가능하여, 대기로 방출되는 온실가스의 양을 크게 줄일 것으로 예상된다. 또한 순산소 순환유동층 연소는 연료의 범용성이 높아 저열량 연료를 비롯해 저급 연료의 활용까지도 가능하다[10-12].

화력발전소에서 흔히 사용하고 있는 역청탄과 아역청탄은 수입에 의존하고 있으며 국내에서 자급자족이 가능한 무연탄은 탄광 폐쇄 등으로 인하여 사용량이 낮으나 러시아 등의 국가에서 일부 수입되어 이용되고 있다. 순환유동층 보일러는 로내 체류시간이 일반적인 미분탄 보일러보다 상대적으로 길어 연소성이 낮은 무연탄, 갈탄 등의 연료들을 높은 효율로 이용할 수 있다. 따라서 전세계의 많은 CFBC (Circulating Fluidized Bed Combustion) 보일러들에서 무연탄, 갈탄 등의 낮은 연소성을 가지는 연료들의 이용이 확대되고 있다. 더욱이 에너지 자원이 부족한 국가들은 상대적으로 풍부하고 비용경제적인 무연탄, 갈탄을 활용하여 온실가스 감축을 달성하기 위해서도 노력하고 있다[5,6].

순환유동층 공정은 다양한 운전 변수가 존재하기 때문에 반응기 내의 동적 거동을 파악하고 최적의 성능을 낼 수 있는 환경을 예측할 수 있는 공정 모델링 및 모사가 필요하다[13]. 전산 유체 역학 모델링은 실험 연구에 비해 상세한 시간과 공간 데이터를 기반으로 기-고 상의 유동 분포에 대한 통찰력을 제공한다는 점에서 일부 연구자들은 반응기 내부 흐름 구조 분석을 위해 시뮬레이션 접근 방식을 선호하고 있다[14]. IEA-CFBC 모델을 이용한 저급탄의 순산소 연소 특성 연구[6]와 순환유동층 보일러 성능 연구[15,16], 무연탄을 이용한 순환 유동층 최적 운전 온도에 관한 시뮬레이션 연구[17], Eulerian-Eulerian 접근법을 이용한 석탄 연소 연구[18]를 통해 수치 시뮬레이션 기술과 컴퓨터 성능이 지속적으로 발전함에 따라 전산 해석에 대한 연구도 다양해지고 있다.

고밀도의 입자 특성을 효율적으로 시뮬레이션하기 위해 MP-PIC (MultiPhase Particle-In-Cell) 방법을 기반으로 하는 Eulerian-Lagrangian 모델이 개발되었으며 이 방식은 순산소 순환유동층에서 기체 및 고체 흐름 예측에 사용되는 가장 중요한 방법으로 활발하게 이용될 수 있다. 기체상은 Eulerian 방식의 그리드로, 고체상은 Lagrangian

방식의 그리드로 계산되는 Eulerian-Lagrangian 방식의 CPFD (Computational Particle-Fluid Dynamics) 모델은 입자의 크기나 밀도와 같은 특성의 유사성에 따라 하나의 계산 입자로 그룹화하여 입자군의 움직임과 고체 응력을 고려해 계산 효율성을 향상시켰다[19-21]. Wu 등[22]은 CPFD 방법이 기체-고체 유동층의 복잡한 유체 역학 및 화학 반응 특성을 고찰하는데 효과적이며 유망한 시뮬레이션 툴이 될 것으로 예상하였다. CPFD 기법은 이미 전 세계적으로 석유화학산업, 정제, 발전, 가스화 공정 등 유동층 관련 산업 분야에서 다양하게 활용되고 있다. Blaser 등[23]은 FCC (Fluidized Catalytic Cracking) 반응기 사이클론 마모를 CPFD 기법으로 예측하고, 반응기의 구조를 변경하여 반응기의 마모를 감소시켰다. Parker 등[24]는 폴리실리콘 증착 연구에 CPFD 기법을 활용하였다. 더불어 O'Hem 등[25]은 CPFD 기법을 이용하여 CFBC의 수력학적 특성을 심도있게 분석하였다. 또한 PSRI (Particulate Solid Research, Inc.)에서는 Jet Cup, Gas Bypassing, Stripper 연구, 사이클론 볼텍스(Vortex) 안정화 등 다양한 영역에서 CPFD 기법을 활용하고 있으며, NETL (National Energy Technology Laboratory)에서는 케미컬루핑, 탄소 포집 연구 등 이외에도 VCFB 모델링 등에서 CPFD를 활용하고 있다[26,27]. 국내의 발전사 및 연구기관에서도 반응기의 Trouble shooting 개선, 격자 변경에 따른 사이클론의 효율향상, 압력 층 안정화, 유동사 재순환율 개선, 연소효율 향상 등 CPFD 기법을 이용하여 반응기 성능향상을 위한 다양한 연구를 수행하고 있다[28-31].

Moon 등[5]과 Diez 등[32]은 순환유동층에서 무연탄을 이용한 연구는 낮은 반응성으로 인해 다른 연료와 혼소하는 연구[33-36]가 주로 진행되었고 연소성이 낮은 연료 자체를 대상으로 하는 연구가 많이 진행되지 않았다고 하였다. 또한 일부 공기 및 순산소 조건에서의 유동 특성 연구[37]가 진행되었으나 실제 고온의 연소 조건에서의 유동 특성은 고찰되지 않았다. 따라서 순산소 순환유동층 보일러의 상용화를 위해서는 연소성이 낮은 연료들의 연소성을 순산소 순환유동층 관련 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 CPFD 방법에 기반한 Barracuda®의 상용 소프트웨어를 이용하여 순산소 순환유동층 보일러의 실제 운전 조건을 고려하여 무연탄의 거동을 해석하고 반응기 내부 흐름을 고찰하였다. 이를 통해 순산소 순환유동층 보일러 상용화를 위한 설계인자 및 최적화된 운전조건을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수학적 모델

2-1. 지배방정식 및 화학 반응(chemical reaction kinetic)

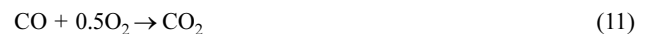
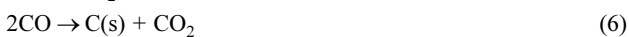
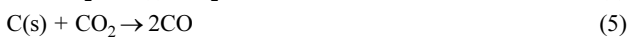
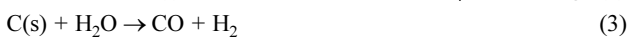
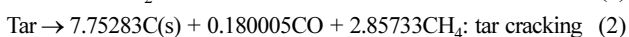
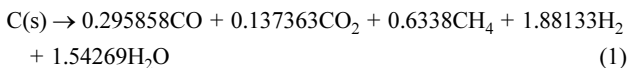
MP-PIC 접근 방식을 기반으로 기-고 흐름 거동을 해석하기 위해 사용하는 지배방정식은 Table 1과 같다. 연속방정식, 운동량 방정식이 화학 반응과 결합되어 순환유동층 시스템에서 공기 및 순산소 연소의 전산해석을 가능케 한다[19,38]. 기체상과 고체상 간의 상호 운동량 전달은 항력 모델로 설명된다. 입자에 작용하는 힘을 계산하는 항력 모델로는 0.01-0.7의 고체 농도를 가지는 Gidaspow에 의해 제안된 항력 모델로서 희석층 시스템에 적합한 Wen-Yu 함수와 고밀도 시스템에 적합한 Ergun 함수를 혼합하는 WenYu-Ergun 모델이 사용되었다. WenYu-Ergun 모델은 순환유동층 보일러에서 Geldart B 및 D 입자의 흐름 해석에 널리 사용된다[39-40].

순환유동층 보일러에서의 석탄 연소는 상대적으로 높은 온도에

Table 1. Governing equations for gas-solid phase [42]

Continuity equation	$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g) = \delta m_p$
Momentum equation	$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\nabla p_g + \mathbf{F}_{gs} + \alpha_g \rho_g \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g$
Stress tensor	$\boldsymbol{\tau}_g = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_{g,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{g,j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}$
Particle acceleration equation	$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{D}_p (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p) - \frac{\nabla p}{\rho_p} + \mathbf{X} + \mathbf{g} + \frac{\bar{\mathbf{u}}_p - \mathbf{u}_p}{2\tau_D}$
Modified acceleration	$\mathbf{X} = -\frac{1}{\bar{\rho}_p} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_p}{\partial x_i} + \mathbf{g}_i(\alpha_s) \left[\bar{D}(\mathbf{u}_g - \bar{\mathbf{u}}_p) - D(\mathbf{u}_g - \bar{\mathbf{u}}_p) - \left(\frac{1}{\bar{\rho}_p} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right]$
Particle normal stress equation	$\tau_p = \frac{10 P_s \alpha_p^\beta}{\max[(\alpha_{cp} - \alpha_p), \epsilon(1 - \alpha_p)]}$ $\mathbf{g}_i(\alpha_s) = \begin{cases} 0, & \alpha_s = 0 \\ 1, & \alpha_s = \alpha_{s,cp} \end{cases}$
Average particle drag coefficient	$\bar{D} = \frac{\iiint f m D d\mathbf{m}_p d\mathbf{u}_p dT_p}{\bar{\rho}_p \alpha_s}$
Dragaveraged particle velocity	$\bar{\mathbf{u}}_p = \frac{\iiint f m \mathbf{u}_p d\mathbf{m}_p d\mathbf{u}_p dT_p}{\bar{\rho}_p \alpha_s \bar{D}}$
Interphase momentum transfer : WenYu-Ergun drag model	$\mathbf{F}_{gs} = \iiint f \left\{ \left[\mathbf{D}_p (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p) - \frac{\nabla p}{\rho_p} \right] + \mathbf{u}_p \frac{d\mathbf{m}_p}{dt} \right\} d\mathbf{m}_p d\mathbf{u}_p dT_p$ $D_1 = \frac{3}{8} C_d \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{ \mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p }{r_p}, D_2 = \left(\frac{180 \epsilon_p}{\epsilon_g \text{Re}} + 2 \right) C_d \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{ \mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p }{d_p}$ $D_p = \begin{cases} D_1 & \epsilon_p < 0.75 \epsilon_{cp} \\ (D_2 - D_1) \left(\frac{\epsilon_p - 0.75 \epsilon_{cp}}{0.85 \epsilon_{cp} - 0.75 \epsilon_{cp}} + D_1 \right) & 0.75 \epsilon_{cp} \leq \epsilon_p \leq 0.85 \epsilon_{cp} \\ D_2 & \epsilon_p > 0.85 \epsilon_{cp} \end{cases}$ $\text{Re} = \frac{2 \rho_g r_p \mathbf{u}_g - \mathbf{u}_p }{\mu_g}$

서의 복잡한 화학 공정이다. 석탄이 반응기 내로 공급되면 먼저 석탄의 수분이 방출되어 건조 상태가 되며 석탄의 휘발성 열분해가 발생하여 CO, H₂, 타르 및 SO₂와 같은 휘발성 물질들을 배출하게 된다. 다음은 미국 DOE(Department of Energy) 및 NETL에서 개발된 C3M(Carbonaceous Chemistry for Computational Modeling) 프로그램[41]을 활용한 homogeneous 및 heterogeneous의 연소 반응이며 MGAS 모델을 기반으로 한다.



석탄 연소와 오염 물질 형성의 균질 화학반응과 이질 화학반응은 운동 속도를 적용하여 Eulerian 그리드에서 해결된다[40]. 다음 전산해석에 사용되는 주요 석탄 연소 반응식들과 반응속도상수는 Table 2에 나타내었다.

2-2. 전산유체역학 조건

공기 및 순산소 조건에서 저급탄의 연소 특성을 비교하기 위해 본 연구는 Pilot 규모의 0.1MW_{th}급 반응기 모델을 구축하여 시물레이션 실험을 진행하였다. Upadhyay 등[42]은 2D 시물레이션의 한계를 통해 3D 시물레이션이 더 높은 정확도로 흐름 거동을 예측한다는 것을 확인시켰다. 따라서 Fig. 1은 3D 모델 반응기의 기하학적 구

Table 2. Coal combustion chemical reaction kinetic [41]

	Reactions (kmolm ⁻³ s ⁻¹)	Rate Coefficients
(R1)	$r_0=k_0$	$k_0=1964.29\exp((-10668.8)/T)m_{VM}$
(R2)	$r_1=k_1C_{Tar}$	$k_1=173611\exp((-14594.2)/T)$
(R3)	$r_2=k_3C_{H_2O}\cdot k_2^{-1}$	$k_2=\exp(22646.1/T)$ $k_3=0.35266T\theta_f^{-1}m_c$
(R4)	$r_3=k_3C_{H_2}C_{CO}\cdot k_4^{-1}$	$k_4=\exp(6320.14/T)$ $k_5=2.85993\exp(-10)T^2\theta_f^{-2}m_c$
(R5)	$r_4=k_7C_{CO_2}\cdot k_6^{-1}$	$k_6=\exp(22646.1/T)$ $k_7=0.14436T\theta_f^{-1}m_c$
(R6)	$r_5=k_8C_{CO_2}\cdot k_9^{-1}$	$k_8=5.45772\exp^{-13}\theta_f^{-2}m_c$ $k_9=\exp(2364.14/T)$
(R7)	$r_6=k_{11}C_{H_2}\cdot k_{10}^{-1}$	$k_{10}=\exp(8078/T)$ $k_{11}=2.83273e^{-6}T\theta_f^{-1}m_c$
(R8)	$r_7=k_{13}C_{CH_4}^{0.5}\cdot k_{12}^{-1}$	$k_{12}=\exp(13577/T)$ $k_{13}=0.00410463T^{0.5}\theta_f^{-0.5}m_c$
(R9)	$r_8=k_{14}C_{H_2O}C_{CO}+(-k_{15}C_{H_2O}C_{CO})$	$k_{14}=1.62949e^{-5}p^{0.496}\rho_f^{-2}\theta_f\exp((-8425.71)/T)m_{all}\theta_{all}^{-1}$ $k_{15}=1.62949e^{-5}p^{0.496}\rho_f^{-2}\theta_f^2\exp((-8425.71)/T)m_{all}\theta_{all}^{-1}$
(R10)	$r_9=k_{17}C_{H_2}C_{O_2}+(-k_{16}C_{H_2}C_{CO_2})$	$k_{16}=0.0006149p^{0.496}\rho_f^{-2}\theta_f^2\exp((-12381.4)/T)m_{all}\theta_{all}^{-1}$ $k_{17}=0.0006149p^{0.496}\rho_f^{-2}\theta_f\exp((-12381.4)/T)m_{all}\theta_{all}^{-1}$
(R11)	$r_{10}=k_{18}C_{H_2O}^{0.5}C_{O_2}^{0.25}C_{CO}$	$k_{18}=7.91516e^{-9}\theta_f^{-0.75}\exp((-20128.8)/T)$
(R12)	$r_{11}=k_{19}C_{H_2}C_{O_2}$	$k_{19}=1.67427e^{11}\theta_f^{-1}\exp((-15096.6)/T)$
(R13)	$r_{12}=k_{20}C_{O_2}^{1.3}C_{CH_4}^{0.2}$	$k_{20}=1.34384e^{-9}\theta_f^{-0.5}\exp((-24355.9)/T)$
(R14)	$r_{13}=k_{21}$	$k_{21}=6105.92\exp((-10668.8)/T)m_{Moisture}$
(R15)	$r_{14}=k_{22}C_{O_2}$	$k_{22}=639\exp((-13588)/T)\theta_{all}d_{all}^{-1}m_c^{0.33333}m_{ASH}^{-0.33333}$

조를 보여준다. Table 3와 같이 순환유동층 보일러는 직경 0.15 m, 높이 10 m의 연소로와 직경 0.265 m, 높이 1.1685 m의 사이클론, 사이클론에서 루프실로 넘어가는 구간의 재순환부, 고체 순환을 유지해 주는 루프실로 구성된다. 시뮬레이션을 위해 총 61,554개의 셀이 사용되었으며 CPFD 수치 방법론은 MP-PIC 방법을 통합하는데 일반적으로 Eulerian-Eulerian 방식을 사용했던 CFD에 비하여 높은 그리드 해상도를 필요로 하지 않음을 확인하였다[37,38].

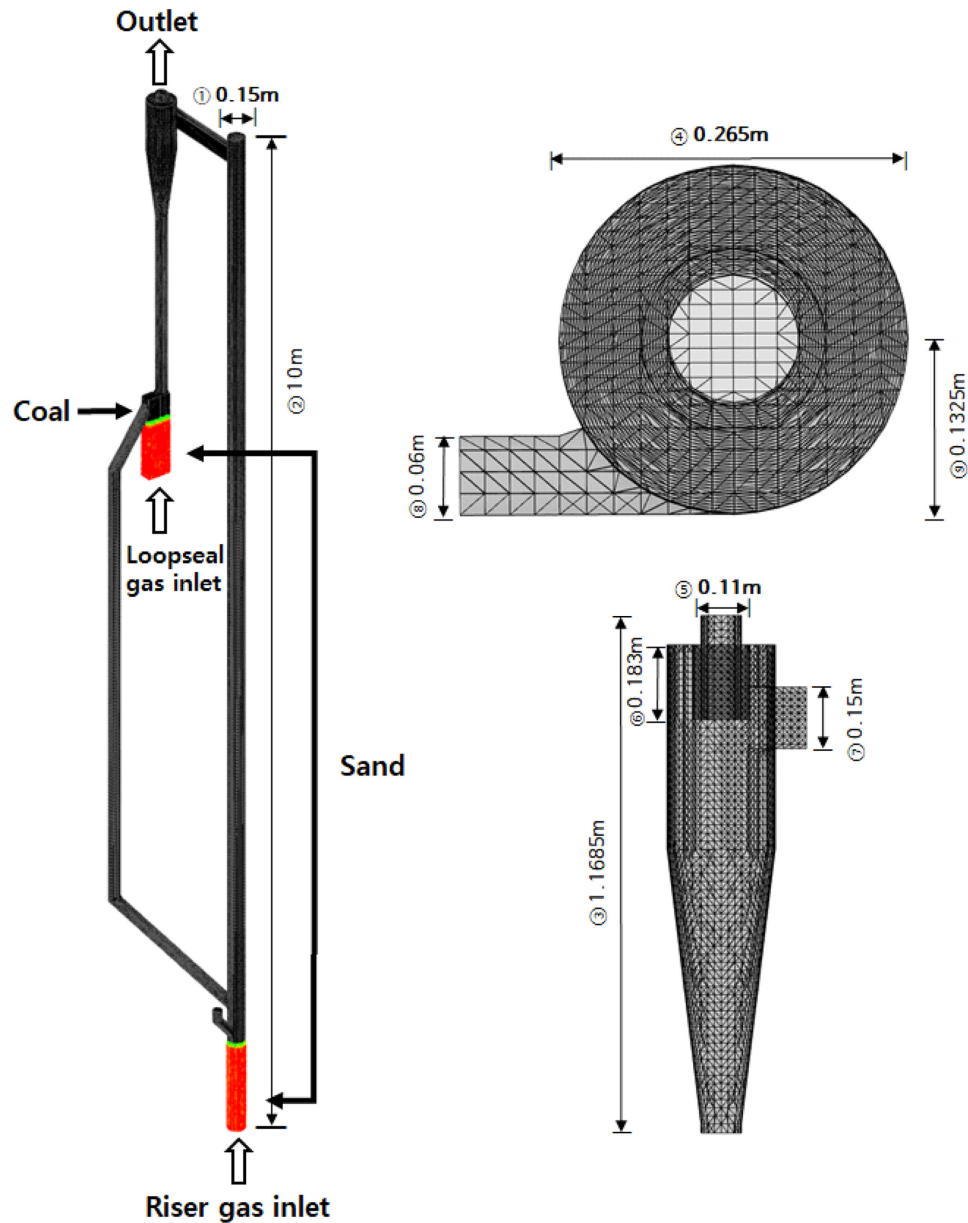
CPFD 수치 방법론 격자 수를 늘릴 경우 격자의 크기가 작아져 입자 크기와 비슷해지기 때문에 입자의 입도분포가 포함되지 못해 오류와 더 높은 계산 비용을 유발하게 된다. 총 격자 셀의 개수는 계산 비용과 정확도 사이의 균형을 고려하여 선택되었다. 총 물질로는 연소로 하단부와 루프실에 2200 kg/m³의 밀도를 가지는 유동사(Geldart B 그룹)를 32.57 kg 채워 넣었다. 평균 입도 1,070 μm, 밀도 2326 kg/m³인 석탄 입자(Geldart D 그룹)는 연소로 상부로 유동하여 사이클론으로 넘어가 배출될 위험분을 최소화시키고 긴 체류 시간을 유지하기 위해 연소로 하부보다는 루프실에 공기 조건 및 순산소 조건에서 13.5 kg/h으로 동일하게 넣어주었다. 시뮬레이션에 사용된 전산해석 경계조건 및 유체 흐름시간은 Table 4에 나열하였다. 루프실에 주입되는 고체 입자들은 연소로로 이동되고, 연소로에 유입된 물질들 중 저밀도의 입자들은 비산되며 고밀도의 입자들은 사이클론으로 포집된다. 사이클론에 포집된 입자들은 가스 흐름으로부터 분리되어 루프실을 거쳐 연소로로 재유입하게 된다. 루프실에 주입되는 석탄 입자들은 KPU탄과 국내 무연탄을 기준으로

공업 분석과 원소분석치는 Table 5에 명시하였다. 사용된 무연탄은 국내 동부 지역 원료로 회재 34.07 wt%, 수분 3.60 wt%, 휘발분 3.89 wt%, 고정탄소 58.44 wt%을 가지며 발열량이 적다(19,200 kJ/kg 이하). IEA-CFBC 모델을 이용한 Gwak 등[6]에서 사용된 KPU탄과 CPFD 모사에 사용된 국내 무연탄의 입자 크기 분포는 동일하게 진행하였다.

3. 결 과 및 고 찰

3-1. 운전 조건에 따른 물리적 특성

무연탄을 이용한 공기 및 순산소 연소 조건에서의 연소로 내 온도 분포는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)와 (b)는 무연탄을 이용한 전산모사 결과와 KPU탄을 이용한 Gwak 등[6]의 IEA-CFBC 모사 결과인 온도 데이터를 각각 비교하여 수행되었다. Fig. 2(a)와 (b)의 연소로 온도 분포는 석탄 유형에 따라 상반된 경향을 보인다. KPU탄 곡선과 비교하여 무연탄 곡선은 연소로 하부에서는 비슷한 온도 분포를 보이다가 상부로 갈수록 하부보다 40~80 °C 높은 온도층인 850~930 °C 사이의 비교적 높은 온도를 유지하였다. 이러한 결과는 휘발분 함량이 많은 KPU 탄과는 다르게 휘발성 함량이 낮고 고정 탄소가 많은 무연탄의 낮은 연소 반응 특성으로, 연소로 상부에서 미연분의 후 연소가 활발하게 일어난다고 보고한 다른 연구의 온도 분포 양상과도 일치한다[5,43]. Fig. 2(c)를 통해 일반적으로 공기 및 순산소 연소 조건에서의 전체 연소로 온도는 균일함을 알 수 있었다. 기체를

Fig. 1. Schematic diagram of the 0.1MW_{th} CFB boiler.Table 3. Geometry of the combustor and cyclone of the 0.1 MW_{th} CFB boiler

Section	Component	Size (m)
Combustor	¹ Diameter	0.15
	² Total height	10
	³ Height	1.1685
	⁴ Diameter	0.265
Cyclone	⁵ Vortex finder diameter	0.11
	⁶ Vortex finder length	0.183
	⁷ Inlet height	0.15
	⁸ Inlet width	0.06
	⁹ Distance	0.1325
Total number of real cells		61,554

분사하는 분산판에서는 대체적으로 낮은 온도를 보이다가 루프실
에서 투입된 석탄이 연소로로 넘어오면서 연소 반응이 시작되는 지

Table 4. Simulation conditions for the air fired and oxy fired CFB

	Air fired		Oxy fired	
Temperature (°C)	850			
Pressure (Pa)	101,325			
Sphericity (-)	1.0			
Riser velocity (m/s)	5			
Loopseal velocity (m/s)	0.1			
Riser gas inlet (vol%)	N ₂	79	N ₂	1
			Ar	2
			O ₂	21
	O ₂	21	CO ₂	76
Loopseal gas inlet (vol%)	N ₂	79	CO ₂	100
	O ₂	21		
Coal mass flow rate (kg/h)	13.5			
Carrier gas	Air	100	CO ₂	100
Time (s)	50			

Table 5. Proximate and ultimate analysis of the coals [12]

Anthracite		
Ultimate analysis (wt%, as dry basis)	C	60.76
	H	0.82
	O	2.41
	N	0.43
	S	0.24
Proximate analysis (wt%, as received basis)	Ash	35.34
	Moisture	3.60
	Volatile matter	3.89
	Fixed carbon	58.44
Ash		34.07
Mean Particle Size (μm)		1070
Density (kg/m^3)		2326

점인 약 2 m 부근에서 온도가 급격히 상승하며 2 m를 넘어가는 연소로 상단부에서는 일정한 온도 분포를 보인다. 또한, 휘발성 가스와 char의 연소 반응에 의해 주로 열이 생성되고 대부분의 입자가 반응이 일어나지 않는 모래(SiO_2)로 이루어져 있어 가스의 온도가 입자의 온도보다 약간 높음을 Fig. 3의 기체 및 고체상의 자세한 온도 분포를 통해 분석하였다. Fig. 3(a)는 공기 연소, Fig. 3(b)는 순산소 연소로 그림을 통해 유체 유입이 이루어지는 분산판에서는 연소 반응이 일어나지 않아 상대적으로 낮은 온도를 보이며 석탄을 주입하는 루프 실 또한 미반응 입자들이 존재함을 알 수 있었다. 연소로 상부에서 사이클론으로 이어지는 부분과 루프실에서의 Fig. 3(b)의 입자상 온도가 높아짐을 보아 후연소가 활발히 일어나고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 CFB의 우수한 열전달 특성으로 인해 공기 및 순산

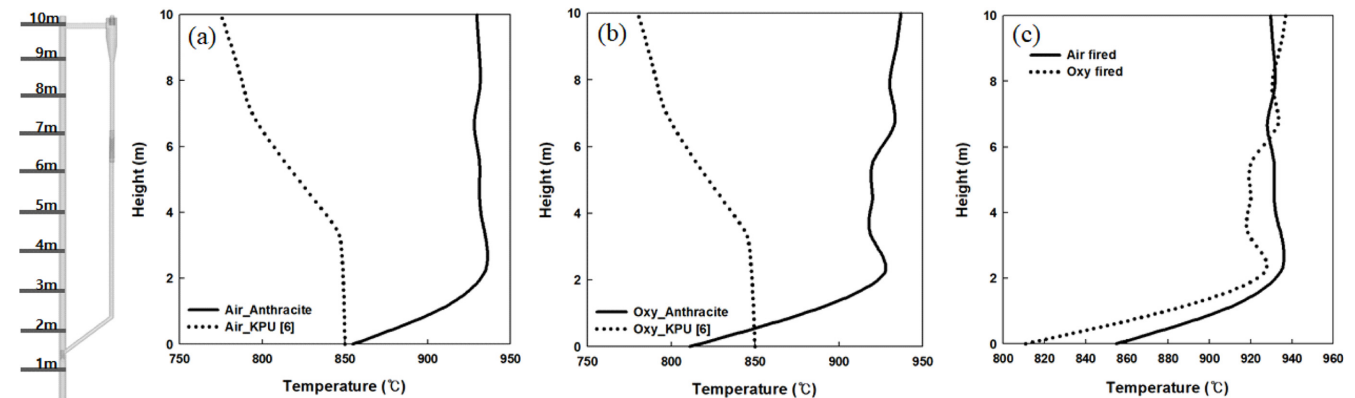


Fig. 2. Temperature profile by height in air and oxy fired condition (a) comparison of anthracite and sub-bituminous coal in air fired condition, (b) comparison of anthracite and sub-bituminous in oxy fired condition, (c) comparison of anthracite in air and oxy fired condition.

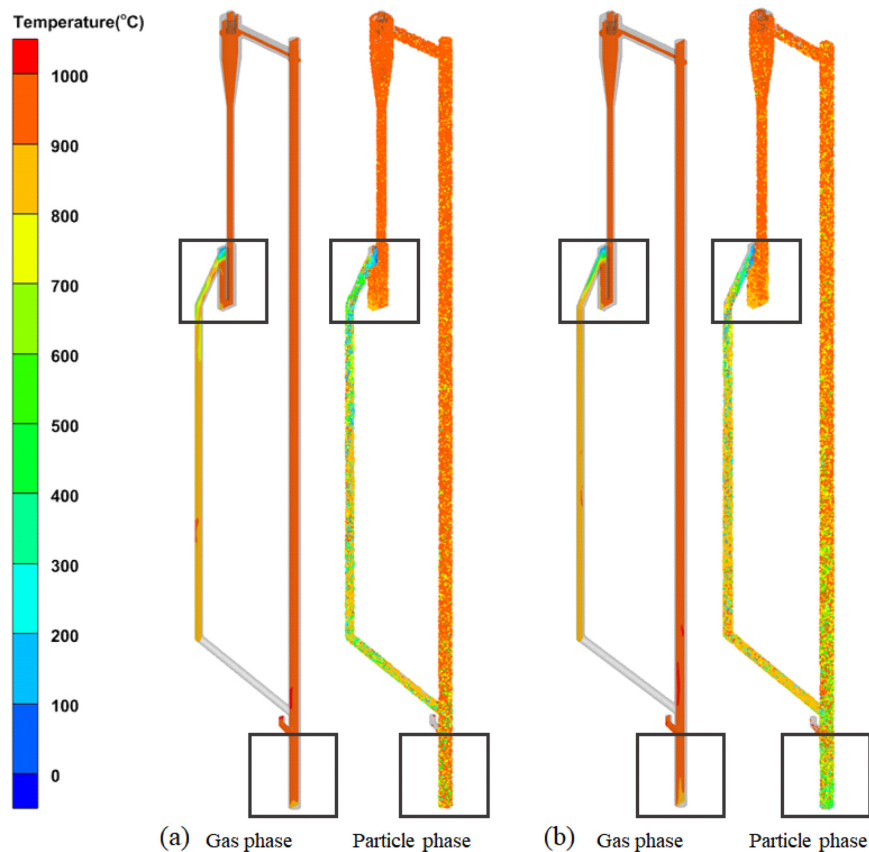


Fig. 3. Temperature distribution of gas and particle phase in the CFB (a) air fired condition, (b) oxy fired condition.

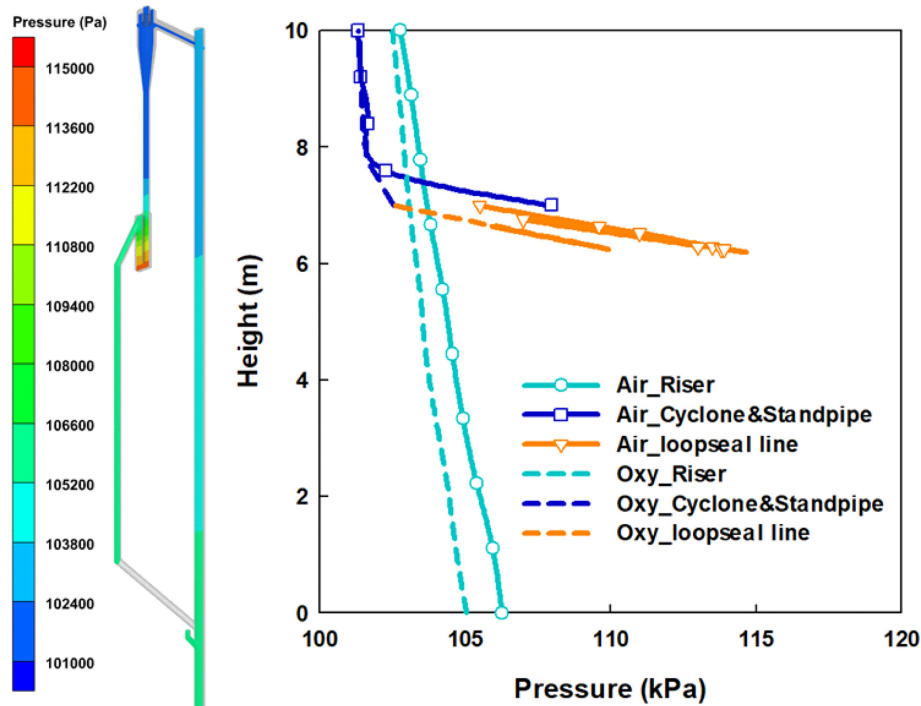


Fig. 4. CFB and full loop pressure distribution profile in air and oxy fired condition.

소 연소 조건에 따른 전체 보일러의 온도 분포는 변화 폭이 크지 않고 비교적 균일하였다[19].

공기 및 순산소 조건에서의 무연탄 연소 시 나타나는 압력 프로파일을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 공기조건과 순산소 조건에서의 상승관, 사이클론&스탠드파이프, 루프실의 압력 구배를 비교하였다. 가스상에서 고체상으로의 운동량 교환이 이루어지면서 두 조건 모두 동일하게 상승관에서의 가스 압력이 감소함을 확인할 수 있었다. 가스 압력은 사이클론에서 떨어지는 입자의 희석 분포로 인해 사이클론 & 스탠드파이프에서 큰 압력차를 보이며 공기와 순산소 조건의 그래프는 비슷한 경향을 보인다. 활발한 유동을 보이는 연소로와는 다르게 유동이 적은 루프실에 고체 입자들이 쌓이게 되면서 루프실은 반응기 내에서 가장 높은 압력을 가지게 된다. 더불어, 장기운전 시에는 불완전연소가 일어난 미연분과 재순환되지 못하거나 후연소를 통해 쌓이게 되는 입자들로 인해 압력에 영향을 줄 수 있다. 또한, Fig. 4를 보면 순산소 조건에서의 압력손실이 공기 조건의 압력손실보다 낮음을 관찰하였다. 이러한 압력손실 변화는 동적 점성도, 밀도, 유속과 같은 매개 변수에 의해 발생하게 되는데 CO₂와 O₂로 구성된 순산소 연소의 동점도는 N₂와 O₂로 구성된 공기 연소의 동점도보다 낮기 때문에 발생한 결과이다[44]. Gwak 등[6]의 KPU탄을 이용한 압력 그래프 또한 두 조건에서 동일하게 압력이 감소한다. 따라서 공기 및 순산소 연소 조건에 따른 운전 압력 및 온도의 차이는 크지 않아 온도와 압력분포의 양상에서 차이가 나타나는 것은 운전조건에 의한 영향이 아닌 석탄의 특성으로 확인되었다[5,45].

공기와 순산소 조건에서의 고체 분율을 Fig. 5에 나타내었다. 그림을 통해 고체 분율이 급격하게 감소하기 시작하는 연소로 약 2 m 부근까지 dense bed 임을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2(c)에서 언급한 바와 같이 dense bed 층에서 급격한 온도 상승과 압력 강하를 보

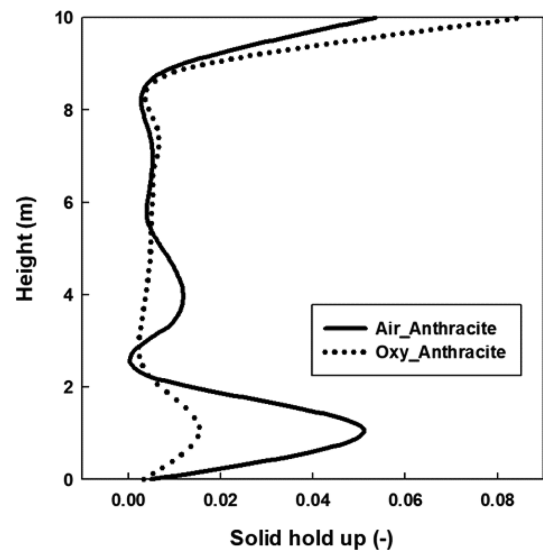


Fig. 5. Solid hold up profile with height of air and oxy fired condition.

이고 있어 전형적인 순환유동층의 구조를 가짐을 알 수 있다. Dense bed 상부에서는 상승관의 높이가 증가함에 따라서 고체 분율이 지속적으로 감소한다[45]. 순산소 및 공기 연소 조건에서의 고체 분율은 큰 차이를 보이지 않았으나 사이클론으로 넘어가는 영역에서는 고체 분율이 증가하고 있다. 이에 비해 IEA-CFBC 모델을 이용한 Gwak 등[6]은 연소로 상부에서도 감소하는 경향을 보인다. 이는 1.5D 모델인 IEA-CFBC 모델을 이용했기 때문에 본 연구와 다른 경향을 보이는 것으로 해석된다. 더불어 무연탄보다 반응성이 좋은 유연탄의 경우, 상승관 상부에서의 후연소보다는 연소로 하부에서 주로 일어나고 있기에 무연탄 연소와는 다른 경향을 보

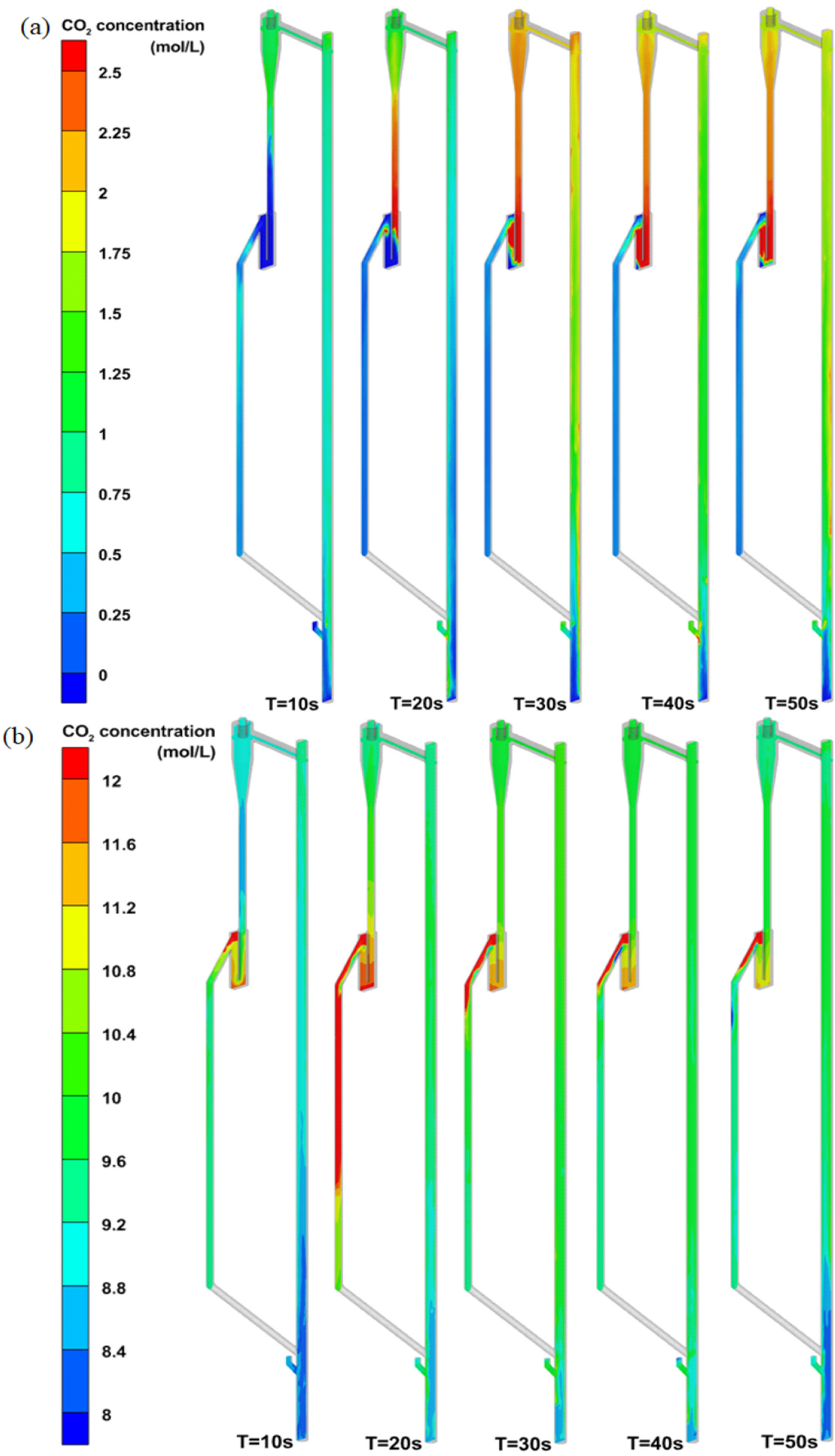


Fig. 6. CFB full loop CO₂ concentration distribution (a) air fired condition, (b) oxy fired condition.

일 수 있다[5]. 무연탄의 결과를 종합했을 때 순환유동층에서의 무연탄은 사이클론 및 루프실과 같은 후단부에서 후연소가 일어나 반응 온도가 상승하고 기체 유속을 증가시켜 로내의 고체 분율의 변화를 야기시킬 수 있다. 즉, 급격한 온도 및 압력 증가로 인한 운전 손실이 발생하게 되어 순환유동층에서 무연탄 이용 시 보일러 설계 및 운전에서 있어서 이에 대한 고려가 이루어져야한다[43].

3-2. 배가스 조성

휘발성 물질과 CO₂, O₂ 및 기타 연소 생성물의 농도 프로파일은

연소를 통한 반응기 내부의 기-고 흐름을 포함한 세부 사항을 반영한다. Fig. 6은 850 °C의 온도에서 공기 및 순산소 연소가 진행되었을 때 시간에 따른 반응기의 CO₂ 농도 분포를 나타낸다. 배출되는 배기가스 그래프를 통해 20~30초에서 보일러 전체에 안정된 흐름 패턴을 보임을 확인할 수 있었다. Fig. 6(a)는 O₂/N₂ 조건에서 진행되었으며 석탄이 투입되는 루프실과 가스 유입구인 분산판에서 가장 낮은 CO₂ 분포를 보인다. 루프실에 주입된 석탄이 연소 흐름에 의해 연소로로 보내지면서 연소로 상승부로 갈수록 하단부에 비해 많은 CO₂ 분포를 가지게 된다. 후단부에서 연소가 활발히 일어나는

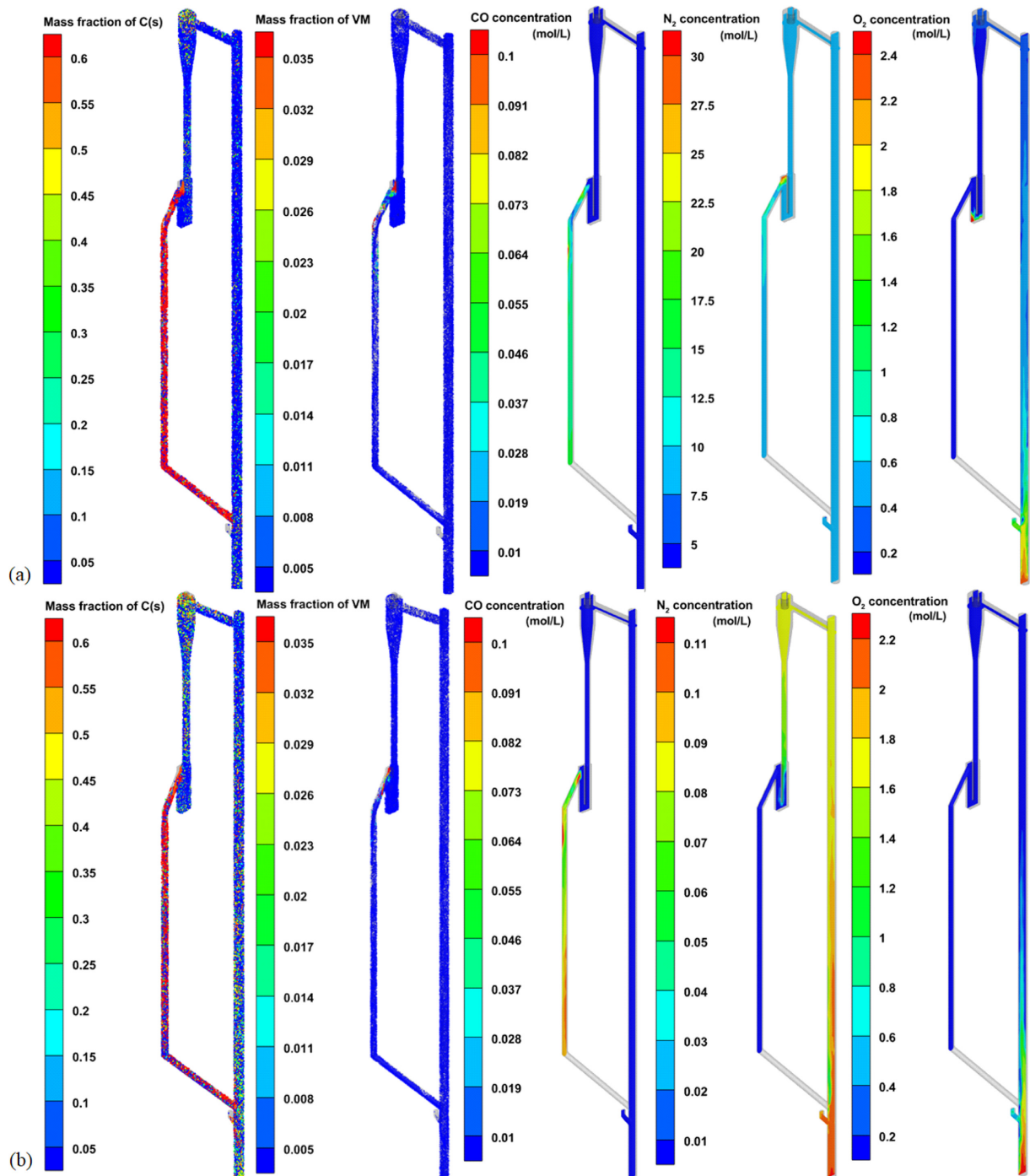


Fig. 7. Full-loop distribution of solid and gaseous species involved in the coal combustion process (a) air fired condition, (b) oxy fired condition.

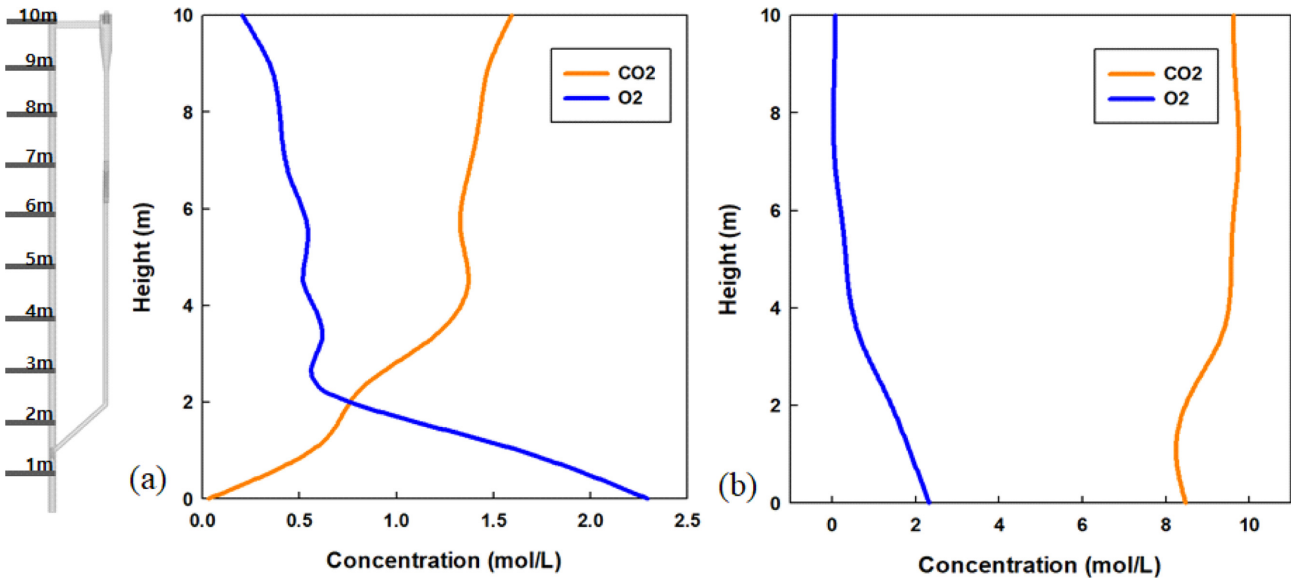


Fig. 8. CO₂/O₂ concentration profile according to riser height (a) air fired condition, (b) oxy fired condition.

무연탄 연소특성상 사이클론과 루프실이 시간이 지날수록 가장 높은 농도의 CO₂를 보였으며 사이클론에서는 annulus와 core의 확연한 CO₂ 농도 차가 나타난다. annulus 영역의 CO₂ 농도보다 core의 CO₂ 농도가 더 높음을 통해 사이클론의 core 영역 연소가 활발했음을 알 수 있고, 석탄 연소 반응을 통해 다른 가스 및 고체 성분들의 농도가 증가하여 상대적으로 낮은 분포를 띠는 것을 확인하였다. Fig. 6(b)는 O₂/CO₂ 조건에서 진행된 CO₂ 농도 흐름을 나타내는 그림으로 (a)와 비슷한 농도 분포 양상을 그리지만 대부분 CO₂로 구성되어 있으며 루프실에서 CO₂ 재순환으로 인해 공기 연소보다 더 높은 농도의 CO₂를 보인다.

연소 반응을 통해 반응기 내에 존재하는 다른 가스 및 고체들의 흐름 분포 변화를 Fig. 7에 나타내어 분석하였다. Fig. 7(a)는 공기 조건, (b)는 순산소 조건에서의 흐름 분포이다. 두 조건은 반응기에 존재하는 고체 및 가스 중에 대한 유사한 분포 패턴을 보였다. 미연 탄소의 농도 분포를 보면 석탄 주입이 이루어지는 루프실-연소로 하단 부분에 미연 탄소가 많이 포집되어 있음을 알 수 있다. 회재 당 배출되는 탄소의 양을 나타내는 미연 탄소 배출 분율(Unburned carbon Fraction)은 석탄주입량과는 관계없이 충분한 공기량으로는 동일한 결과를 나타낸다[46]. 루프실과 이어지는 연소로 하단부를 보면 미세하게 순산소 연소 조건에서 미연 탄소분이 적음을 통해 연소 반응이 공기 조건에서 보다 더 활발히 일어났다고 예상할 수 있다. 하지만 연소로 상부와 사이클론으로 이어지는 부분은 순산소 조건보다는 공기조건에서 더 활발한 연소가 진행되었다. 이러한 결과는 연소로에서의 O₂가 순산소보다는 공기 조건에서 더 많은 농도를 가지기 때문이다. 무연탄의 특성상 적은 함량을 가지는 휘발분은 공기 및 순산소 연소 조건 모두 동일하게 루프실에서 석탄이 주입되자마자 반응이 즉시 이루어졌다. char의 산화 반응, 가스화 반응, 탈휘발 및 균질반응으로 인해 생성되는 CO는 루프실에서의 빠른 반응속도 때문에 급격히 증가하였다. 이는 고정탄소 함량이 높은 무연탄의 불완전연소가 일어난 결과이다. 불완전연소로 인해 생성된 CO는 순산소 연소 조건에서 재순환을 통해 다시 완전연소가 가능하다[5,19]. 또한, 대부분 CO₂를 가지는 순산소 연소 조건에

서보다 공기 연소에서 높은 N₂ 농도를 가지는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있었다. 공기 연소 및 순산소 연소 조건은 비슷한 O₂ 농도를 가지며 이는 CO₂ 농도와는 반대 분포를 나타내었다. Fig. 8은 (a)공기 연소, (b)순산소 연소 조건에서 연소로 높이에 따라 서로 다른 농도 분포를 가지는 CO₂/O₂ 만을 보여주는 그래프이다. 루프실과 연소로 하부로 이어지는 약 2m는 저속 역류 영역으로, 석탄과 휘발성 물질이 완전 연소에 충분한 시간을 갖도록 기여하였다. 결과적으로 Fig. 8(a), (b) 그래프 모두 약 2m를 기점으로 완만한 형태의 기울기를 가지며 CO₂는 완전연소로 인해 증가하는 경향, O₂는 휘발성 방출 또는 가연성 가스 중의 산화로 인해 감소하는 경향으로 서로 다른 농도 분포 양상을 가졌다[45].

4. 결 론

무연탄을 이용한 세부적인 연소 특성을 기-고 흐름에서 분석하기 위하여 본 연구에서는 Pilot 규모의 순환유동층 보일러를 대상으로 공기 연소와 순산소 연소를 CPFD 시뮬레이션을 통해 고찰하였다. 각각의 조건에서 연소로 높이에 따른 온도 분포, 압력 분포, 고체 분율을 비교하였으며 전체 반응기의 기-고 흐름을 통해 조건에 따른 배가스 조성을 확인하였다. 온도, 압력, 고체 분율의 프로파일과 반응기 내부의 흐름을 통해 무연탄의 경우 휘발성 함량이 낮고 고정탄소가 많기 때문에 미연분이 생기면서 후연소가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있었다. 순산소 연소의 경우에는 미연분 재순환이 이루어지면서 많은 CO₂ 농도를 보이며 CO₂ 포집 및 이용에 용이함을 예상해볼 수 있다. 그러나 반응기 후단부의 연소로 인해 급격한 온도 증가를 야기하게 되어 온도 증가로 인한 운전 손실이 발생할 수 있다. 따라서 순산소 순환유동층에서 운전 손실을 최소화할 수 있는 최적의 운전조건을 도출하기 위해 온도, 압력과 같은 다양한 물리적 특성에 대한 연구가 추가로 진행되어야 한다. 추가적인 연구를 통해 순산소 순환유동층 보일러의 상용화를 위한 설계 및 운전에 대한 고려가 이루어진다면 석탄 수입에 의존하지 않고도 국내에 풍부하게 매장되어 있는 무연탄을 경제적으로 활용할 수 있

음을 기대할 수 있다.

감 사

이 논문은 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(과제번호: 20RDPP-C158833)을 받아 수행된 연구입니다.

사용기호

A	: particle acceleration rate [m/s ²]
C _d	: drag model coefficient
D	: drag force [N]
d _s	: mean particle diameter [μm]
d _{or}	: orifice diameter [m]
F _{gs}	: inter-phase momentum transfer rate per volume [kg/m ³ s]
f	: particle distribution function
g	: gravity acceleration [m/s ²]
H	: riser height [m]
m	: mass [kg]
P	: static pressure [Pa]
P _s	: positive constant for particle normal stress [Pa]
Re	: Reynolds number
r	: radius [m]
t	: time [s]
u	: velocity vector [m/s]

Greek letters

α	: volume fraction
τ	: particle normal stress [Pa]
φ	: particle probability distribution function [-]
ε	: constant [-]
θ	: volume fraction [-]
ρ	: density [kg/m ³]
β	: constant [-]
δ	: strain rate tensor [-]
μ	: viscosity [m ² /s]
χ	: ratio of initial volume of particle to volume of agglomerate

Subscriptions

cp	: close pack
eff	: effective viscosity
i, j, k	: coordinate index
p	: particle phase
g	: gas phase

Abbreviation

ASU	: Air Separation Unit
CFB	: Circulating Fluidized Bed
CFBC	: Circulating Fluidized Bed Combustion
CFD	: Computational Fluid Dynamics
GHG	: GreenHouse Gases

References

- Kunze, C., De, S. and Spliethoff, H., "A Novel IGCC Plant with Membrane Oxygen Separation and Carbon Capture by Carbonation-calcinations Loop," *Int. J. Greenhouse Gas Control.*, **5**, 1176-1183(2011).
- International Energy Outlook 2016, U. S. Energy Information Administration(2016).
- Lee, C. T., Hashim, H., Ho, C. S. and Fan, Y. V., "Sustaining the Low-carbon Emission Development in Asia and Beyond: Sustainable Energy, Water, Transportation and Low-carbon Emission Technology," *J. Cleaner Prod.*, **146**, 1-13(2017).
- Kunze, C. and Spliethoff, H., "Assessment of Oxy-fuel, Pre- and Post-combustion-based Carbon Capture for Future IGCC Plants," *Appl. Energy*, **94**, 109-116(2012).
- Moon, J. H., Jo, S. H., Mun, T. Y., Park, S. J., Kim, J. Y., Khoi, N. H. and Lee, J. G., "Oxy Combustion Characteristics of Anthracite in a 100 kW_{th} Circulating Fluidized Bed System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**, 400-407(2019).
- Gwak, Y. R., Kim, Y. B., Keel, S. I., Yun, J. H. and Lee, S. H., "Analysis of Oxygen Combustion Characteristics of a Low Grade Coal Using IEA-CFBC Model," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**, 631-640(2018).
- Yang, C. W., Kim, Y. D., Bang, B. R., Jeong, S. H., Moon, J. H., Mun, T. Y., Jo, S. H., Lee, J. G. and Lee, E. D., "Oxy-CFB Combustion Technology for Use in Power-generation Applications," *Fuel*, **267**, 117206(2020).
- Singh, R. I. and Kumar, R., "Current Status and Experimental Investigation of Oxy-fired Fluidized Bed," *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **61**, 398-420(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).
- Kang, S. Y., Go, E. S., Seo, S. B., Kim, H. W., Keel, S. I. and Lee, S. H., "A Comparative Evaluation of Recarbonated CaCO₃ Derived from Limestone Under Oxy-fuel Circulating Fluidized Bed Conditions," *Sci. Total Environ.*, **758**, 143704(2021).
- Kim, Y. B., Gwak, Y. R., Keel, S. I., Yun, J. H. and Lee, S. H., "Direct Desulfurization of Limestones Under Oxy-circulating Fluidized Bed Combustion Conditions," *Chem. Eng. J.*, **377**, 119650(2019).
- Gwak, Y. R., Yun, J. H., Keel, S. I. and Lee, S. H., "Numerical Study of Oxy-fuel Combustion Behaviors in a 2MW_e CFB Boiler," *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 1878-1887(2020).
- Ngo, S. I. and Lim, Y. I., "Multiscale Eulerian CFD of Chemical Processes: A Review," *ChemEngineering*, **4**, 1-27(2020).
- Abdi, H., Pourmahmoud, N. and Soltan, J., "A Novel CFD Simulation of H₂ Separation by Pd-based Helical and Straight Membrane Tube," *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 2041-2053(2020).
- Lee, J. M. and Kim, J. S., "Simulation of the Tonghae Thermal Power Plant CFB by Using IEA-CFBC Model-Determination of the CFB Combustor Performance with Cyclone Modification," *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 53-61(2000).
- Kim, S. M., Lee, J. M., Kim, J. S. and Song, K. K., "Evaluation of Performance for the Tonghae CFBC with Operation Param-

- ters," *Energy Eng. J.*, **9**, 250-260(2000).
17. He, H. and Zhuang, H., "Study on the Optimal Running Temperature of Circulating Fluidized Bed Boiler Burning Fujian Anthracite," *Adv. Mater. Res.*, **732**, 291-296(2013).
 18. Wu, Y., Liu, D., Ma, J. and Chen, X., "Three-Dimensional Eulerian-Eulerian Simulation of Coal Combustion under Air Atmosphere in a Circulating Fluidized Bed Combustor," *Energy Fuels*, **31**, 7952-7966(2017).
 19. Gu, J., Zhong, W. and Yu, A., "Three-dimensional Simulation of Oxy-fuel Combustion in a Circulating Fluidized Bed," *Powder Technol.*, **351**, 16-37(2019).
 20. Shi, X., Sun, R., Lan, X., Liu, F., Zhang, Y. and Gao, J., "CPFD Simulation of Solids Residence Time and Back-mixing in CFB Risers," *Powder Technol.*, **271**, 16-25(2015).
 21. Wang, Q., Niemi, T., Peltola, J., Yang, H., Lu, J. and Wei, L., "Particle Size Distribution in CPFD Modeling of Gas-solid Flows in a CFB Riser," *Particuology*, **21**, 107-117(2015).
 22. Wu, Y., Peng, L., Qin, L., Wang, M., Gao, J. and Lan, X., "Validation and Application of CPFD Models in Simulating Hydrodynamics and Reactions in Riser Reactor with Geldart A Particles," *Powder Technol.*, **323**, 269-283(2018).
 23. Blaser, P., Thibault, S. and Sexton, J., "Use of Computational Modeling for FCC Reactor Cyclone Erosion Reduction at the Marathon Petroleum Catlettsburg Refinery," *The 14th International Conference on Fluidization - From Fundamentals to Products*, May, Netherlands, 347-354(2013).
 24. Parker, J. M., "Validation of CFD Model for Polysilicon Deposition and Production of Silicon Fines in a Silane Deposition FBR," *Int. J. Chem. React. Eng.*, **9**, A40(2011).
 25. O'Hern, T. J., Trujillo, S. M., Torczynski, J. R., Tortora, P. R., Oelfke, J. B. and Bhusarapu, S., "Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics Experiments for the Multiphase Fluid Dynamics Research Consortium (MFDRC)," *Sandia report*, SAND2006-4914(2006).
 26. Cocco, R., "How PSRI Streamlines Our Work Process Using Barracuda VR," *2019 Barracuda User Conference in Chicago*, June, Chicago, Illinois, USA(2019).
 27. Weber, J., "Modeling of a Vortexing Circulating Fluidized Bed (VCFB) for Process Intensification," *2019 Barracuda User Conference in Chicago*, June, Chicago, Illinois, USA(2019).
 28. Kook, J. W., "CPFD Simulation Analysis to Improve Cyclone Efficiency and Combustion Performance of CFBC," *2019 Barracuda User conference in Korea*, November, Daejeon, Korea(2019).
 29. Lee, E. D., "Improving Simulation Performance of CFBC Boiler by Using Multi-dimensional Numerical Analysis," *2019 Barracuda User conference in Korea*, November, Daejeon, Korea(2019).
 30. Choi, H. S., "Numerical Simulation for Fast Pyrolysis of Biomass in a Spouted Bed," *2019 Barracuda User conference in Korea*, November, Daejeon, Korea(2019).
 31. Lee, D. Y., "Cold Bed Simulations Applied Non-uniform Inlet Flow Rate Through CFD and a Grid Resolution Test on a Dual Bed Reactor," *2019 Barracuda User conference in Korea*, November, Daejeon, Korea(2019).
 32. Díez, L. I., Lupiáñez, C., Guede, I., Bolea, I. and Romeo, L. M., "Anthracite Oxy-combustion Characteristics in a 90 kWth Fluidized Bed Reactor," *Fuel Process. Technol.*, **139**, 196-203(2015).
 33. Lee, J. M., Kim, D. W. and Kim, J. S., "Characteristics of Co-combustion of Anthracite with Bituminous Coal in a 200-MWe Circulating Fluidized Bed Boiler," *Energy*, **36**, 5703-5709(2011).
 34. 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 Circulating Fluidized Bed Boiler," *Energy*, **35**, 2814-2818(2010).
 35. 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).
 36. 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**, 429-435(2012).
 37. Upadhyay, M., Park, H. C., Hwang, J. G., Choi, H. S., Jang, H. N. and Seo, Y. C., "Computational Particle-fluid Dynamics Simulation of Gas-solid Flow in a Circulating Fluidized Bed with Air or O₂/CO₂ as Fluidizing Gas," *Powder Technol.*, **318**, 350-362(2017).
 38. Go, E. S., Kang, S. Y., Seo, S. B., Kim, H. W. and Lee, S. H., "Slug Characteristics in a Bubbling Fluidized Bed Reactor for Polymerization Reaction," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**, 1-7(2020).
 39. Gu, J., Shao, Y. and Zhong, W., "Study on Oxy-fuel Combustion Behaviors in a S-CO₂ CFB by 3D CFD Simulation," *Chem. Eng. Sci.*, **211**, 115262(2020).
 40. Gu, J., Liu, Q., Zhong, W. and Yu, A., "Study on Scale-up Characteristic of Oxy-fuel Combustion in Circulating Fluidized Bed Boiler by 3D CFD Simulation," *Adv. Powder Technol.*, **31**, 2136-2151(2020).
 41. <https://mfex.netl.doe.gov/c3m/>.
 42. Upadhyay, M., Seo, M. W., Naren, P. R., Park, J. H., Nguyen, T. D. B., Rashid, K. and Lim, H. W., "Experiment and Multiphase CFD Simulation of Gas-solid Flow in a CFB Reactor at Various Operating Conditions: Assessing the Performance of 2D and 3D Simulations," *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 2094-2103(2020).
 43. 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," *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 516-522(2000).
 44. Jung, H. N., Kim, J. H., Back, S. K., Sung, J. H., Yoo, H. M., Choi, H. S. and Seo, Y. C., "Combustion Characteristics of Waste Sludge at Air and Oxy-fuel Combustion Conditions in a Circulating Fluidized Bed Reactor," *Fuel*, **170**, 92-99(2016).
 45. Yang, S., Wang, S. and Wang, H., "Numerical Study of Biomass Gasification in a 0.3 MW_{th} Full-loop Circulating Fluidized Bed Gasifier," *Energy Convers. Manage.*, **223**, 113439(2020).
 46. 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**, 1-9(2005).