Korean Chem. Eng. Res., 58(4), 642-650 (2020)
https://doi.org/10.9713/kcer.2020.58.4.642
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

바라쿠다 시뮬레이션을 이용한 유동층 외부 열교환기의 유동해석

이종민† · 김동원 · 박경일 · 이규화

한전 전력연구원 발전기술연구소
34103 대전광역시 유성구 문지로 105
(2020년 6월 3일 접수, 2020년 6월 24일 수정본 접수, 2020년 7월 2일 채택

Analysis of Fluidization in a Fluidized Bed External Heat Exchanger using Barracuda Simulation

Jongmin Lee†, Dongwon Kim, Kyoungil Park and Gyuhwa Lee

KEPCO Research Institute 105, Munji-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, Korea
(Received 3 June 2020; Received in revised from 24 June 2020; Accepted 2 July 2020)

요 약

순환유동층 보일러에서 유동 입자들의 순환 경로는 연소로에서 비산된 입자들이 사이클론에서 포집되어 비기계적 밸브인 실포트(Sealpot)를 거쳐 연소로로 재순환하는 일반적인 경로를 갖는다. 그러나, 유동 입자들로부터 열을 추가적으로 흡수하기 위해 유동층 외부열교환기(FBHE; Fluidized Bed Heat Exchanger)가 설치된 경우, 실포트의 일부 입자들은 FBHE를 거쳐 연소로로 재순환하는 경로를 갖게 된다. 이때 기포유동층 영역으로 운전되는 FBHE는 실포트로부터 유입되는 고온(800~950 °C)의 입자들의 유동 특성에 따라 열교환 튜브의 국부적 가열로 인한 손상 및 hot spot에 의한 입자들의 고온 뭉침(agglomeration)이 발생할 수 있어 순환유동층의 안정적 조업에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 국내 D 순환유동층 보일러의 FBHE에 대한 운전자료 분석 및 바라쿠다를 통한 CPFD(Computational Particle Fluid Dynamics) 해석을 통해 구조적 문제로부터 발생하는 열흐름의 불균일성을 밝혀내었다. 실제 D 순환유동층의 FBHE 열교환 튜브 온도는 실포트의 고체온도 변화와 가장 밀접한 상관관계를 나타내었으며, FBHE 내의 열흐름의 불균일성은 FBHE의 조업 유속의 증가(0.3→0.7 m/s)로는 그 불균일성을 해소하기 어려운 것으로 나타났다. 그러나, FBHE로 유입되는 고온 입자들에 대한 사전 혼합 영역(Premixing Zone)이 설치된 경우와, 연소로로 재순환되는 입자 배출라인의 대칭화를 통한 구조변경 시, 입자 혼합의 증대와 더불어 열흐름의 불균일성은 상당 부분 감소하는 것으로 고찰되었다. 이에, FBHE의 구조 최적화가 열교환 성능 및 운전 안정성을 확보하는 대안임을 제시하였다.

Abstract – In general, the circulation path of the fluidized particles in a CFB (Circulating Fluidized Bed) boiler is such that the particles entrained from a combustor are collected by a cyclone and recirculated to the combustor via a sealpot which is one of non-mechanical valves. However, when a fluidized bed heat exchanger (FBHE) is installed to additionally absorb heat from the fluidized particles, some particles in the sealpot pass through the FBHE and then flow into the combustor. At this time, in the FBHE operated in the bubbling fluidization regime, if the heat flow is not evenly distributed by poor mixing of the hot particles (800~950 °C) flowing in from the sealpot, the heat exchanger tubes would be locally heated and then damaged, and the agglomeration of particles could also occur by formation of hot spot. This may affect the stable operation of the circulating fluidized bed. In this study, the unevenness of heat flow arising from structural problems of the FBHE of the domestic D-CFB boiler was found through the operating data analysis and the CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics) simulation using Barracuda VR. Actually, the temperature of the heat exchanger tubes in the FBHE showed the closest correlation with the change in particle temperature of the sealpot. It was also found that the non-uniformity of the heat flow was caused by channeling of hot particles flowing in from the sealpot. However, it was difficult to eliminate the non-uniformity even though the fluidizing velocity of the FBHE was increased enough to fluidize hot particles vigorously. When the premixing zone for hot particles flowing in from the sealpot is installed and when the structure is changed through the symmetrization of the FBHE discharge line for particles re-

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jm.lee@kepco.co.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.

flowing into the combustor, the particle mixing and the uniformity of heat flow were found to be increased considerably. Therefore, it could be suggested that the structural modification of the FBHE, related to premixing and symmetric flow of hot particles, is an alternative to reduce the non-uniformity of the heat flow and to minimize the poor particle mixing.

Key words: Fluidized bed heat exchanger, Barracuda simulation, Particle mixing, Heat flow

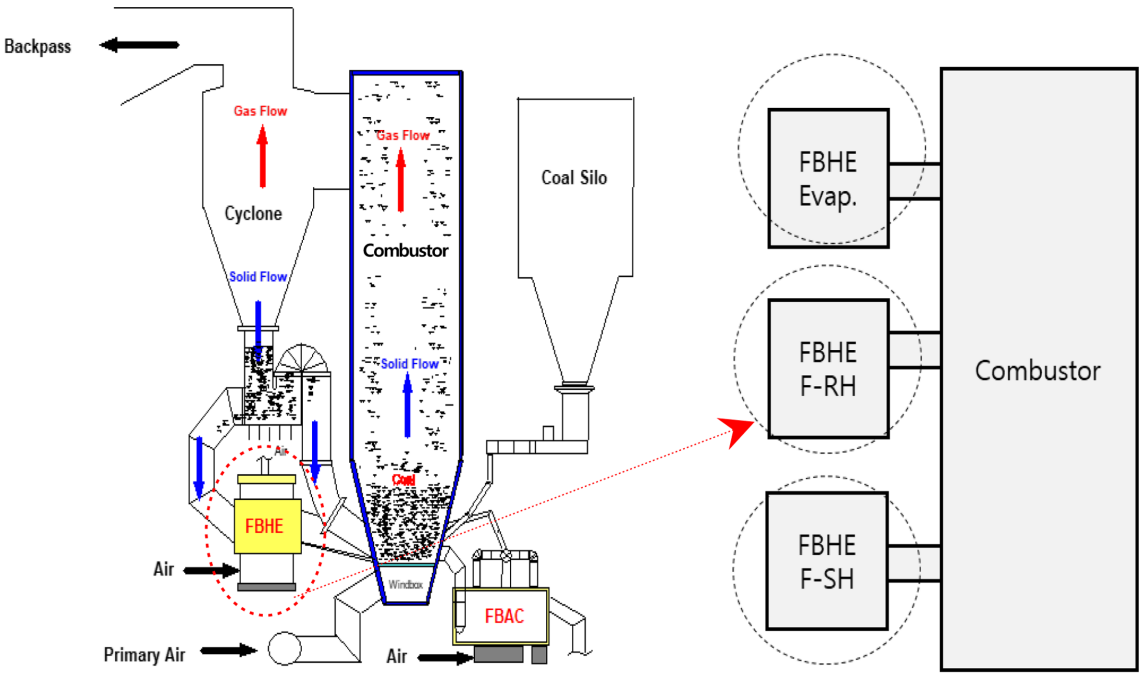
1. 서 론

화석연료의 청정에너지로의 활용에 있어 순환유동층 보일러는 고효율의 저급에너지원 활용기술로서 수십여 년간에 걸쳐 많은 관심과 시장 성장을 이루어왔다[1-3]. 경제적 에너지 전환방법의 일환으로 대용량화가 되어 감에 따라 열흡수 및 연소로 온도조절 등의 목적으로 유동층 외부열교환기(FBHE)를 두고 사이클론에서 포집된 입자를 직접 연소로로 재순환하기 전에 이곳으로 우회하여 입자로부터 열을 흡수한 후, 연소로로 재순환하는 방식을 적용하게 된다[4-5]. 특히, 연소로가 대형화 됨에 따라 FBHE의 개수 또한 증가하는 방식으로 구성되어, 열 흡수 후 재순환되는 입자의 온도 및 입도, 순환량에 따라 전체 순환유동층 보일러의 성능은 크게 영향을 받는 것으로 보고되고 있다[4,6-7]. 국내 D-화력의 순환유동층 보일러는 현재 3개의 사이클론과 이와 연결된 3개의 FBHE를 갖고 있다. 각각의 FBHE에 구성된 열교환 튜브를 통해, 증발기, 최종과열기 및 최종재열기 역할을 수행 중이나, 3개의 FBHE 구성에 따른 비대칭 형태의 구조로 중앙에 위치한 최종재열기의 운전이 간헐적으로 불안전하게 운전되는 것으로 알려져 있다[4,8]. 이러한 FBHE는 기포유동층 영역으로 운전되는 형태로, 공탑 유속이 0.2~0.3 m/s로 비교적 낮은 유속으로 운전되고 있어 입자의 유동이 원활하지 않을 경우, FBHE 내의 열전달 및 국부적 가열로 인한 열교환 튜브의 손상 및 입자 뭉침(agglomeration)의 원인이 되어 전체 조업의 중단까지 발생시킬 수 있는 위험이 있다. 그러나, 이러한 위험에도 불구하고 FBHE의 해석 및 원인진단은 거의 이루어진 경험이 없으며, 문제 발생 시, 현장에서의 유속 조절을 통한 일시적인 해결을 통해 운전을 유지하거나 일시 정지를 통해 국부가열 및 비유동으로부터 발생된 클링커 해소 후 재조업하는 방법을 쓸 수밖에 없다. 그러나 이러한 운전방식은 궁극적인 문제의 해결책이 될 수 없으며, 원인진단을 통한 구조변경 또는 조업방식의 변화를 주어야 할 것으로 판단된다.

한편, 유동층 해석에 있어 다양한 전산 기법을 통한 해석 및 진단을 수행하고 있으며, 비교적 간단하고 그 효용성이 입증된 CPFD (Computational Particle Fluid Dynamics)의 기법을 이용한 바라쿠다(Barracuda) 해석툴은 사이클론 및 실포트(또는 룹씰, Loopseal) 그리고 순환유동층 연소로 등 순환유동층 단위영역뿐만 아니라, 전체 순환 고리 해석에서도 매우 유용하게 활용되고 있다[9-15]. 특히, 대용량 유동층 영역에 있어 실험적 접근이 어려운 상황의 유동 및 열흐름 모사를 통해 다양한 해결책을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 본 연구에서는 국내 D-화력의 순환유동층에 구성된 FBHE의 구조적 문제로부터 야기되는 열교환 튜브의 온도상승 및 손상에 대한 원인을 도출하고, FBHE의 유동해석과 열흐름 해석을 통해 그 대응방안을 제시하고자 한다.

2. 순환유동층 FBHE 구성 및 해석 방법

D-순환유동층의 개략도 및 FBHE의 배열도를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, D-순환유동층 보일러는 1개의 연소로와 3개의 사이클론 및 이와 연결된 3개의 FBHE로 구성된 순



a) Schematic diagram b) Arrangement of FBHEs

Fig. 1. Schematic diagram and FBHEs' arrangment of D-CFB boiler.

환 고리(Circulating Loop)를 가진 장치로, 연소로에서 비산되어 순환된 입자는 사이클론에서 포집되어 실포트로 유입된 후, 연소로로 재순환되는 일반적인 순환 경로를 지닌다. 여기서, 실포트는 학술적으로 룹씰(Loopseal)로 명명되곤 하는데, 본 연구에서는 설계 제작사의 모델 명칭인 실포트로 명명하여 사용하였다. 한편, 실포트로 유입된 순환 입자들 중 일부는 실포트 하부에 있는 ACV(Ash Control Valve)의 개도 조절에 따라 FBHE로 우회하여 유입되며, 이때 유입된 입자들은 FBHE 내에 열교환 튜브로 열을 전달한 후 연소로로 재순환하는 경로를 가진다. 이때 ACV 개도에 따라 FBHE로 유입되는 고온의 고체량이 결정되며, D-순환유동층 3개의 FBHE 각각은, 열교환 튜브의 역할에 따라 증발기, 최종과열기 및 최종재열기로 구성된다. 한편, Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이, FBHE로부터 연소로로 연결된 재순환 라인은 증발기(Evap) 및 최종과열기(F-SH)의 경우 중앙에 위치하나, 최종재열기(F-RH)는 FBHE 측면에 재순환 라인이 위치하는 점이 차이가 난다. 각 FBHE는 기포 유동층(bubbling fluidized bed) 영역에서 운전되도록 FA(Fluidizing Air) 팬에서 적절한 유동화 공기가 공급되나, FA 팬(fan) 하나에 FBHE 뿐만 아니라, 실포트 및 연소로에서 배출된 회(Ash)를 냉각하여 처리하는 유동층회재냉각기(FBAC : Fluidized Bed Ash Cooler)의 유동화 공기도 댐퍼 조절을 통해 동시에 공급받는 방식으로 FA flow 조절 시 상호 영향을 받는 형태로 구성되어 있다.

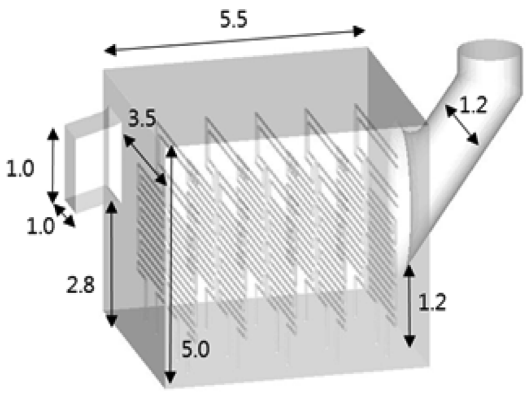
Table 1은 층온도의 범위가 500~800 ℃ 될 때를 기준 범위로 선정하여 FBHE의 운전자료를 나타낸 것이다. 각각의 FBHE 내의 공탑속도(U_o)는 0.18~0.34 m/s 범위에 있으며 이는 FBHE 내의 평균 입도인 300 μm에 대한 최소유동화 속도(U_{mf}) 대비 4.5~10.6 U_{mf}사이의 비교적 원활한 유동화 영역에서 운전됨을 보인다. 한편, FBHE 내의 열교환 튜브의 용적(38%)을 고려한 유속으로 환산시, 0.29~0.55 m/s 값을 나타내고 있어 실제로는 더욱 활발한 유동화 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, Table 1에 나타낸 바와 같이 실제 F-RH FBHE의 유량이 가장 높게 운전되고 있으며 이는 앞서 언급한 바와 같이 연소로에 연결된 재순환 라인의 비대칭 구성으로 인한 입자 흐름의 불균일성이 나타나 고체 혼합 정도를 높이기 위해 유속을 올려 운전하는 것으로 이해되고 있다. 이에 본 연구에서는 다른 두 FBHE에 비해 비교적 운전 문제점이 다수 발생하는 것으로 알려져 있는 F-RH FBHE를 대상으로 고체 혼합에 따른 열분포 해석 및 이의 해결을 위한 FBHE 형태 개조 시의 고체 혼합 및 열분포 해석 또한 도출하였다.

본 연구에서는 FBHE의 시뮬레이션 해석을 위해 삼차원의 유체와 입자들의 모멘텀 수식을 각각 Eulerian과 Lagrangian으로 간주하여 계산하는 CPFD 방식의 독자적 구현을 하는 Barracuda VR (17.2.0) 상용 코드를 사용하였다. Fig. 2(a)는 바라쿠다 해석을 위한 F-RH FBHE의 개략도를 나타내었다. F-RH FBHE는 높이 5.0 m, 너비 5.5m 그리고 폭 3.5m의 직사각형 형태로 이루어져 있으며, 입자 흐름 방향으로 우측에 연소로로 재순환하는 라인이 구성되어 있다. F-RH FBHE 내의 열교환 튜브는 63.5 mm 직경을 지닌 튜브가 8행(row), 46열(column)로 매우 조밀하게 구성된 형태이나 격자 구성 및 해석의 간편함을 위해 8행, 5열로 간략화하여 그 대상을 구성하였다. 본 바라쿠다 해석에 사용된 격자 구성은 200,000개 이상으로 구성되어 있으며, 사용된 FBHE내의 입도분포는 Fig. 2(b)에 그리고 해석의 가정 및 경계조건은 Table 2에 나타내었다.

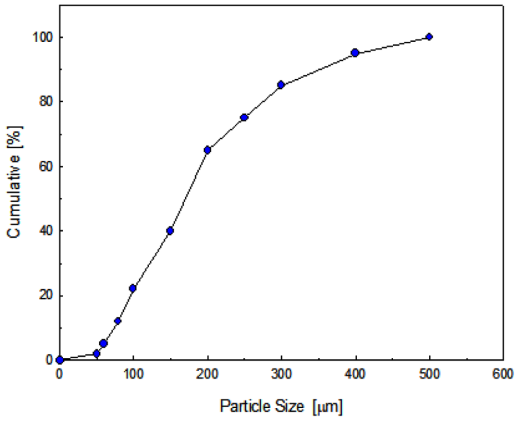
한편, 본 연구의 대상인 F-RH FBHE의 구성 및 형태를 바꾸었을 경우 나타나는 성능변화를 고찰하기 위해 Fig. 3에 F-RH FBHE의

Table 1. Analysis of FBHEs' operation conditions

Classification	FBHE					
	Evap.	F-SH	F-RH	Evap.	F-SH	F-RH
Avg. bed temp. [°C]		500			800	
Flow rate [kg/s]	2.16	2.55	2.95	2.16	2.55	2.95
U_o [m/s]	0.179	0.211	0.243	0.248	0.293	0.338
U_{mf} ($P_{avg.}$ = 300 μm)		0.040			0.0319	
U_o/U_{mf} [-]	4.5	5.3	6.1	7.8	9.2	10.6
Tube fraction [%]			38			
U_f [m/s]	0.288	0.340	0.393	0.400	0.472	0.545



(a) FBHE (F-RH)

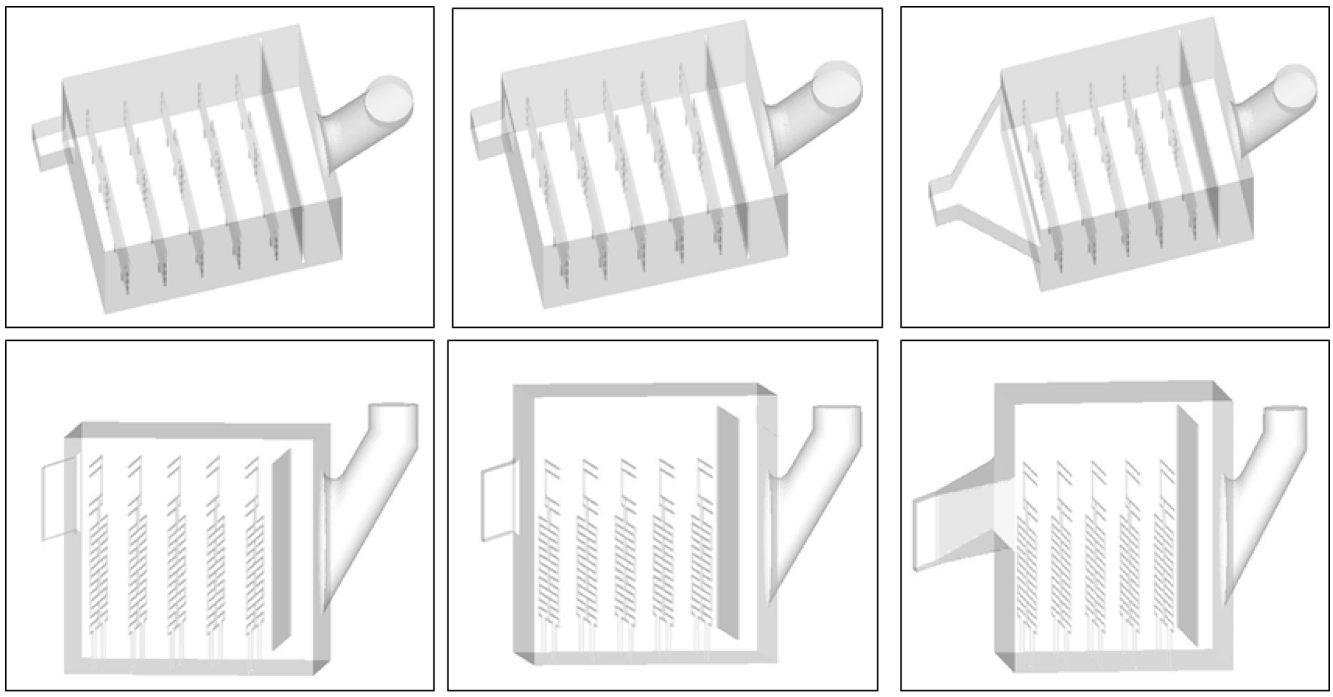


(b) Particle size distribution

Fig. 2. Schematic diagram of a FBHE(F-RH) for Barracuda simulation.

Table 2. Simulation conditions of FBHE (F-RH)

Classification			FBHE
Drag model [16-18]			Wen & Yu-Ergun with agglomeration
Fluid	property		air and particles without reaction
	temp. [°C]		800
	press. [Pa]		101,325
Flow B.C.	solid	flow rate [kg/s]	250
		temperature [°C]	900
	fluidizing air	flow rate [m/s]	0.3~0.7 (2.16~5.39 [kg/s])
		temperature [°C]	230
		pressure [Pa]	120,000
Pressure B.C.	FBHE inlet [Pa]		112,300 [Pa]
	FBHE outlet [Pa]		102,300 [Pa]
Particle	size [μm]		0~500 with size distribution
	sphericity [-]		0.85
	density [kg/m^3]		2,600
Geometric change	solid return line		biased / centered
	division wall		without / with, expanded



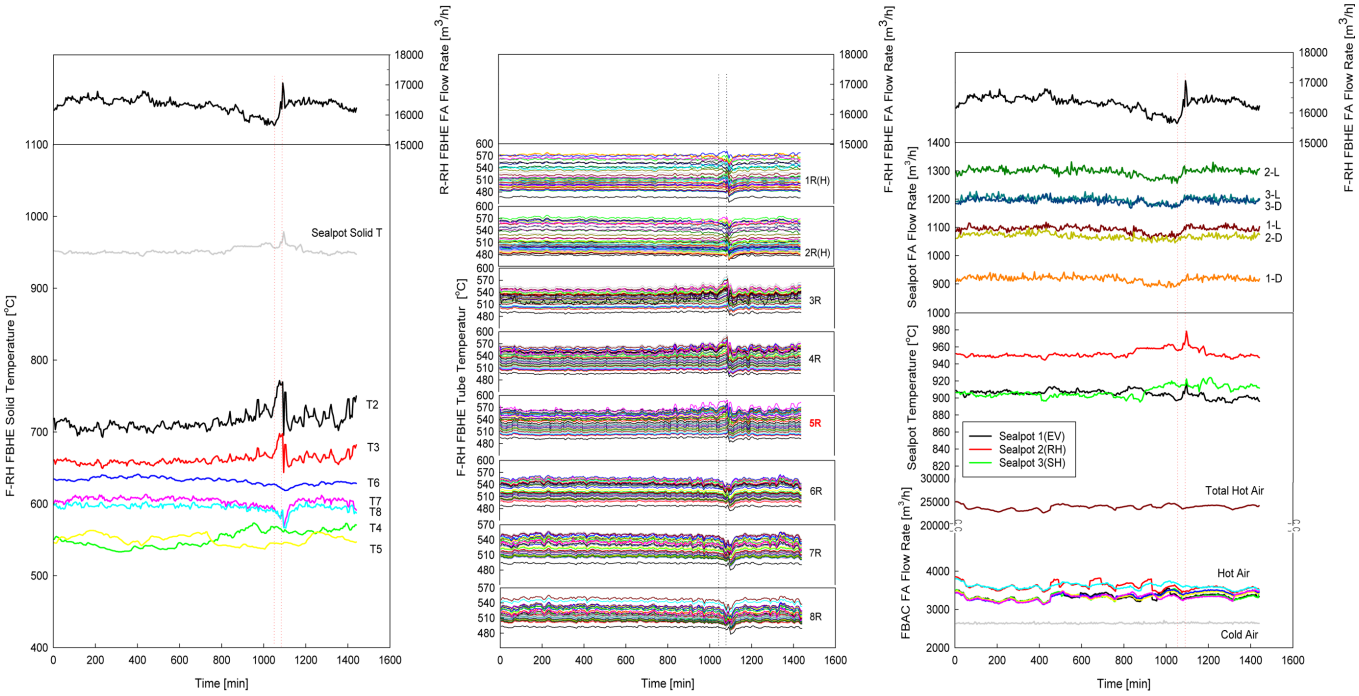
(a) with division wall (b) with expanded division wall (c) with centered exit line

Fig. 3. Schematic diagram of a FBHE(F-RH) for Barracuda simulation.

3가지 변경된 형태를 제안하여 그 영향을 해석하였으며, 각 경계조건은 Table 2에 조건과 동일하게 적용하였다. 변경 제안된 형태로는 FBHE로 입자가 투입되는 영역에 경계막(division wall)을 설치하여 순환, 투입된 입자가 사전에 혼합되는 영역(15% 너비 확장)을 갖도록 하는 경우(Fig. 3(a))와, 사전 혼합영역의 확대를 위한 경계막의 높이를 높였을 경우(Fig. 3(b), FBHE 및 경계막 높이 30% 확장) 그리고 이에 추가하여 입자의 출구를 중앙에 깔때기 형태로 구성한 경우(Fig. 3(c))로 나누어 그 영향을 해석하였다. 이때 FBHE 주 열교환 영역 및 격막에 의해 새롭게 형성된 사전 혼합 영역에 공급되는 유동화 공기량은 초기 개조 전의 유동화 공기량과 동일한 유속이 확보되도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

D-순환유동층은 사이클론 및 FBHE가 각각 3개로 구성된 순환루(loop)을 가지고 있는 보일러로, 중앙 사이클론에 연결된 F-RH FBHE는 Fig. 4에 나타낸 바와 같은 운전 형태를 띤다. 먼저, Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이, 사이클론에서 포집되어 실포트로 유입된 순환입자의 온도가 서서히 증가함에 따라, FBHE 고체층 일부 영역에서의 온도 상승이 고찰되고 있으며, 이로 야기된 다양한 운전 변화가 고찰되었다. Fig. 4(a)에 나타낸 T2~T4는 FBHE 내에 고체흐름 방향으로 우측면에 설치된 고체층 온도분포이며, T5~T8는 좌측면에 설치된 고체층 온도분포로, 실포트의 고체층 온도증가에 따라



(a) Sealpot and FBHE conditions (b) FBHE tube temperatures (c) FA flow change with sealpot temperatures

Fig. 4. Correlative operation variables with tube temperatures in a FBHE(F-RH).

FBHE 고체 흐름 방향으로 우측면에 설치된 T2~T4 영역의 고체층 온도는 증가하는 반면, 좌측면 고체층 온도는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 FBHE 내의 유동현상이 Table 1에 나타낸 바와 같이 매우 격렬한 기포유동층 영역에서 운전되고 있음에도 불구하고 온도가 감소하는 현상을 나타내는 것은, 고체 혼합에 따른 문제라기보다는 다른 운전 변수에 따라 FBHE 고체층의 좌측과 우측 영역이 각각 다른 영향을 받는 것으로 이해될 수 있다. 이는, 고체 혼합이 잘 이루어짐에도 불구하고 열교환 튜브의 온도 편차나 온도 패턴의 역전현상이 갑자기 발생하였을 경우, 국부적으로 열교환 튜브로의 열전달 양의 차이 또는 역으로 열교환 튜브로부터 열을 전달받는 경우가 발생하여 좌, 우측 영역의 온도역전 현상이 나타난 것으로 판단된다.

한편, FBHE의 국부적 고체층 온도상승은 Fig. 4(b)에 나타낸 FBHE 내의 일부 열교환 튜브(3R~5R, 우측면 열교환 튜브군)의 온도상승을 일으키며, 일부 열교환 튜브군(5R)은 제한 온도치를 벗어나는 상승을 보여, 궁극에는 FBHE의 유동화 공기량을 늘려(Fig. 4(a) 및 (c)) 국부적 온도상승을 제어하려는 운전 패턴을 보여주고 있다. 이는 FBHE 내의 좌, 우측으로 편류가 형성된 고온의 입자 흐름의 혼합을 증대시켜 온도상승에 대한 위험을 제거하려는 운전방식으로 판단된다. 그러나 일부 튜브군(5R)의 경우 온도증가가 완전히 해소되지 않고 지속해서 높게 운전되고 있음을 볼 수 있다. 한편, FBHE 내의 좌, 우측 열교환 튜브군(3R~5R, 6R~8R)의 온도 변화가 상반되는 현상을 고찰할 수 있는데, 이는 좌측 열교환 튜브군의 온도가 갑작스럽게 증가하면서 열교환 튜브 내의 증기 흐름 저항에 따라 우측 증기 흐름량의 일시적 증가로 인한 온도의 감소가 나타나 이러한 비대칭적 증감 패턴이 발생하는 것으로 이해된다. 이는 결과적으로 우측 열교환 튜브 온도 감소로 인해 Fig. 4(a)에서 나타낸 FBHE 내의 우측 고체층 온도(T5~T8)를 감소시키는 것으로 이해된다.

한편, D-순환유동층의 경우, 앞서 언급한 바와 같이 FA 팬 한곳에서 댐퍼 조절을 통해 FBAC 그리고 실포트 및 FBHE에 필요한 유동화 공기를 모두 공급하는 구조로 구성되어 있다. 이에, FBHE의 유동화 공기량의 증가 시, FBAC에 비해 비교적 적은 공기량이 공급되는 실포트의 유동화 공기량이 영향을 받아 실포트로 주입되는 유동화 공기량이 약간 상승하고 이로 인한 고체 입자 혼합 및 연소반응 증대로 실포트 고체층 온도 또한 약간 피크 상승을 보인 후 감소하는 패턴을 보여주고 있다(Fig. 4(c)).

그러므로, 상기의 Fig. 4에서 나타낸 FBHE 운전 특성은 결과적으로 실포트의 고온 순환입자가 FBHE로의 유입 시, 흐름의 불균일성이 FBHE 내의 열교환 튜브의 국부적 온도상승을 가져오며, 이의 해소를 위한 FA 증가는 열교환 튜브 온도 증가의 국부적 해소를 가져올 수는 있으나 전체 열교환 튜브의 온도증가를 해소하기는 어려운 것으로 나타났다.

이러한 현상에 운전 변수에 대한 성능 영향 분석을 바라쿠다 해석을 통해 Fig. 5에 나타내었다. 먼저, FBHE 내의 유동화 속도(U_f)가 0.3 m/s일 경우, FBHE 내로 고온의 입자가 유입됨에 따른 고체 입자의 유동화 및 입자 혼합 그리고 온도분포에 대해 Fig. 5(a), (b), (c)에 각각 도시하였다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이, 고체 입자의 유동화 현상은 국부적 비유동 지역의 발생 없이 비교적 원활하게 유지되고 있으나, Fig. 5(b)와 (c)에 나타낸 바와 같이 FBHE로 유입된 고온 입자들의 혼합 및 이에 따른 온도분포는 입자의 흐름 방향으로 편류가 일어나 일부 영역에서 비혼합에 따른 온도상승이 고찰되고 있다. 특히, 입자의 출구 방향으로의 편류와 유동층 표면에서의 비혼합이 이러한 온도상승의 결과를 일으키는 것으로 고찰되었다. 이는 기포 유동층 영역에서 입자의 투입과 배출이 있는 즉, 흐름이 있는 상태에서의 입자 혼합은 혼합 속도보다 입자의 흐름

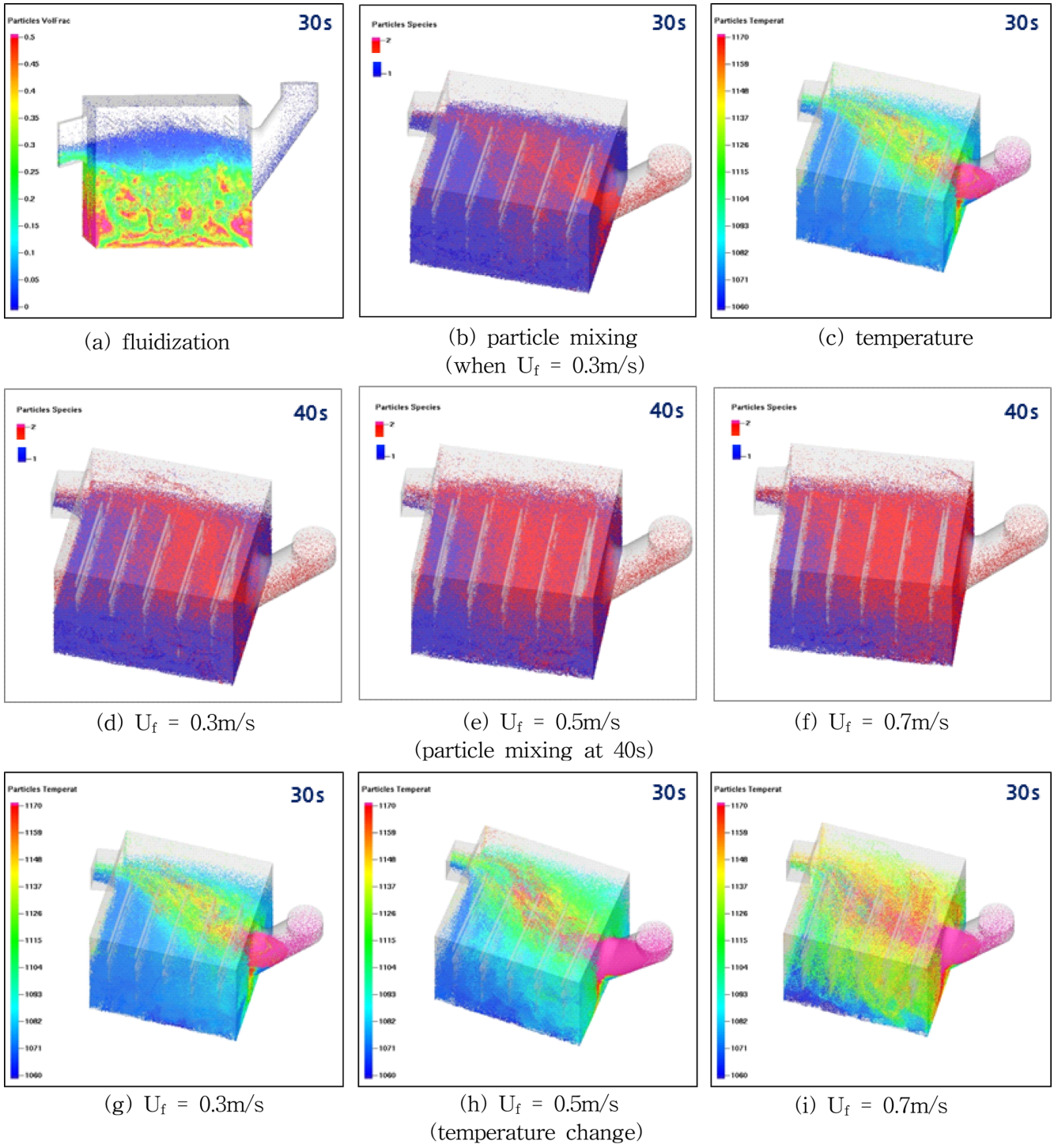


Fig. 5. Particle fluidization, mixing and temperature with fluidizing gas velocities (0.3, 0.5, 0.7 m/s) in a FBHE (F-RH).

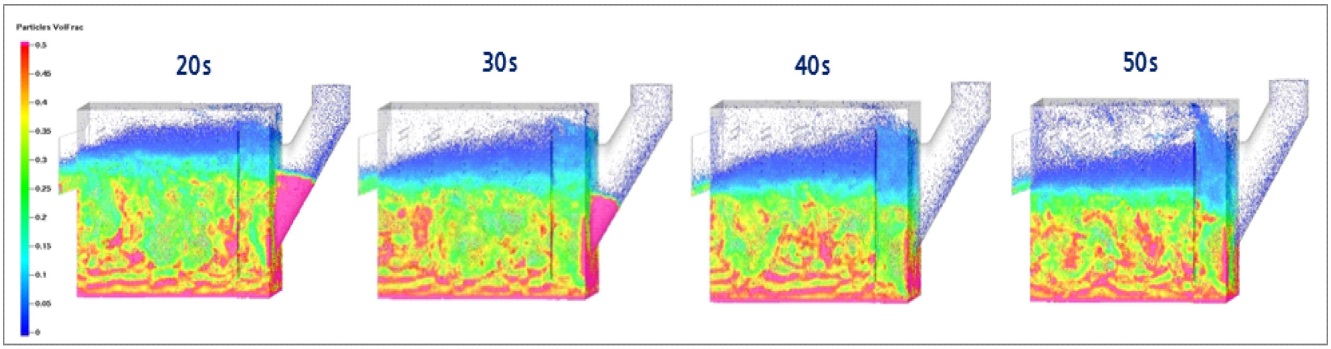
속도가 더 큰 경우에 발생하는 것으로 이해되며, 특히, 편류의 방향은 입자의 배출라인 위치에 큰 영향을 받는 것으로 보인다.

한편, FBHE 내의 유동화 속도(U_f)를 0.3 m/s에서 0.7 m/s까지 증가시켰을 때, 입자 혼합 및 온도분포를 Fig. 5(d)~(i)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입자 혼합 및 온도분포는 유속이 증가함에 따라 고체 입자의 혼합 증가와 더불어 이로 인한 온도분포 또한 유속이 낮은 경우에 비해 고르게 변화함을 고찰할 수 있다. 그러나, Fig. 5(f)와 (i)에 나타낸 바와 같이, 기존 유속에 비해 2배 이상의 유속 증가를 하는 경우라도 고온의 입자가 유입되는 초기에는 편류의 흐름이 지속해서 고찰되고 있어 이에 대한 궁극적인 해결책이 요구된다. 더불어, 입자 혼합의 경우, 30초 경과 후 패턴은 온도분포((g)~(i))와 유사하게 나타나, 40초 후의 입자 혼합 정도를 나타내었으며, Fig. 5(d)~(f)에서 보는 바와 같이 30초 후의 열흐름의 편류에 비해 시간이 지남에 따라서도 고체 입자의 혼합 증가가 일부 일어나 유속 증가와 더불어 시간이 충분히 흘러야지만 입자 혼합 및 온도 분포가 기존에 비해 고르게 변화함을 고찰할 수 있다.

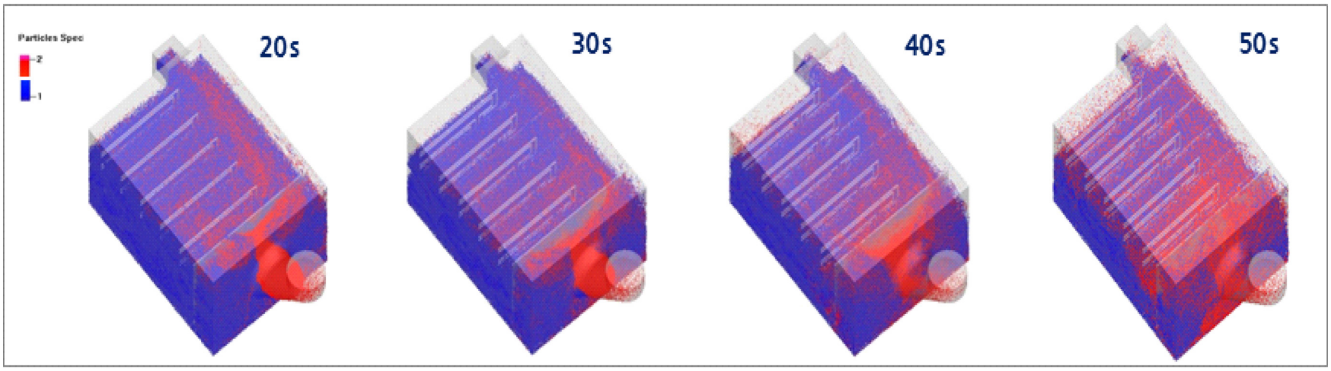
한편, Fig. 5에 나타낸 해석적 결과는 Fig. 4에 나타낸 실제 FBHE 내의 운전 현황을 잘 모사하고 있다. Fig 5에 나타낸 고온 입자의 편류 흐름은 FBHE 내의 우측 열교환 튜브군(3R~5R)의 온도를 상승시키며 이의 해소를 위해 FBHE 유량을 증가시키면 어느 정도 해소되나 일부 해소되지 않는 영역(5R)이 존재하는 것으로 이해될 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이, 고온 입자가 실포트에서 바로 FBHE 내로 들어가지 않도록 격막(division wall)을 설치하여 사전 혼합 영역을 갖도록 한 경우에 대해 시간에 따른 유동 및 입자 혼합 그리고 온도분포 변화를 나타낸 것이다. 이는 FBHE 내에 사전 혼합 영역을 갖춤으로써 실포트로부터 유입되는 고온의 입자들이 열교환 튜브군과의 직접 접촉하는 흐름을 지연함과 동시에 입자의 국부적 편류 흐름을 완화하기 위함이다. 더불어, 격막을 설치하더라도 비교적 낮은 유속의 유동화 조건이어서 입자 마모 및 벽면의 마모는 크게 일어나지 않을 것으로 판단된다. 여기서, 격막으로 나눠진 사전 혼합 영역의 유동화 공기량은 주 유동층과 동일한 유속으로 주입되는 것으로 설정하였다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이, 주어진 공기량 조건(2.16 kg/s)은 최소 4.5 U_{mf} 조건으로 비교적 원활한 유동화가 형성되는 유속으로, 시간에 상관없이 항상 유동화가 잘 일어나는 것으로 고찰되었다. Fig. 6(b)에 나타낸 고체 혼합의 경우에는 격막에 의한 사전 혼합영역이 존재함으로 인해 Fig. 5의 격막이 없는 경우에 비해 비교적 고체 혼합은 증가하고 및 입자 흐름의 편류가 작아짐을 고찰할 수 있었다. 또한, Fig. 6(c)에서 볼 수 있듯이 온도분포 또한 격막이 없는 경우에 비해 비교적 고르게 분포됨을 고찰할 수 있었다. 이는 격막으로 분리된 영역에서 입자들이 사전 혼합을 통해 열교환 튜브가 있는 주 유동영역으로 고르게 넘어가는 것으로 이해할 수 있다. 그러나, Fig. 6에서 보듯이, 입자의 최종 출구가 흐름 방향으로 우측에 존재함으로써 완전하게 편류를 제거하지는 못하는 것으로 고찰되었다.

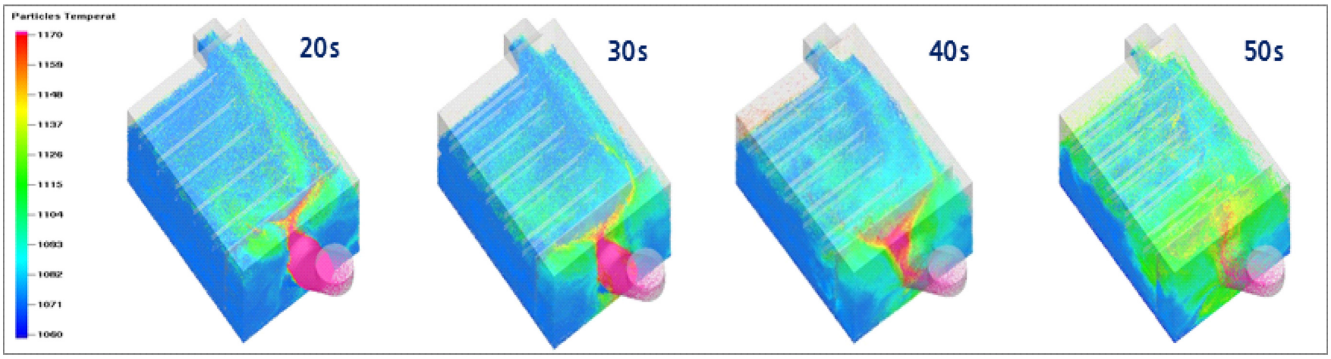
실포트로부터 FBHE로 유입되는 고온 입자의 사전 혼합 영역을



(a) fluidization at 20, 30, 40, and 50s

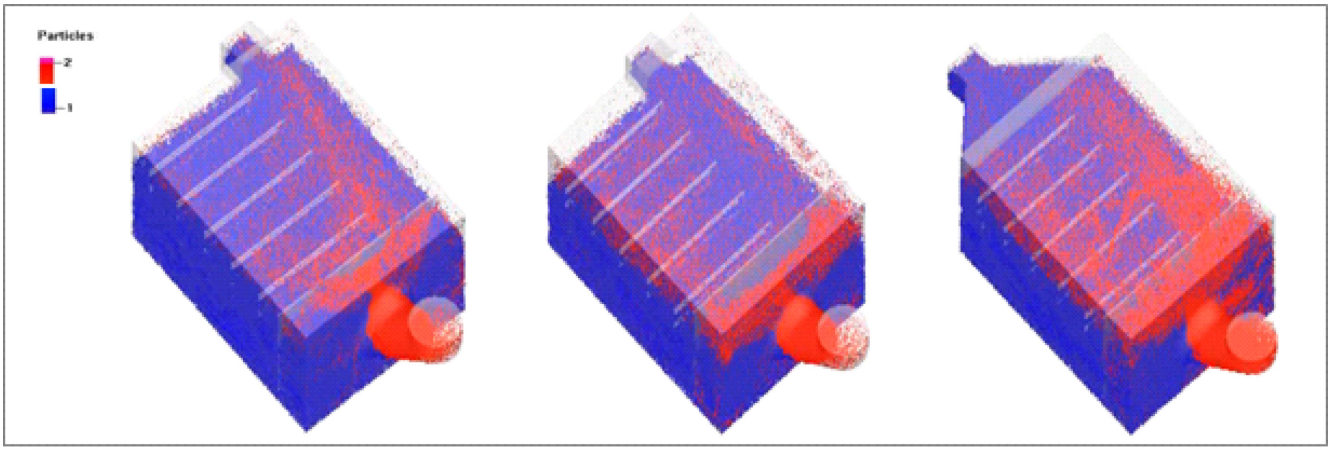


(b) particle mixing at 20, 30, 40, and 50s

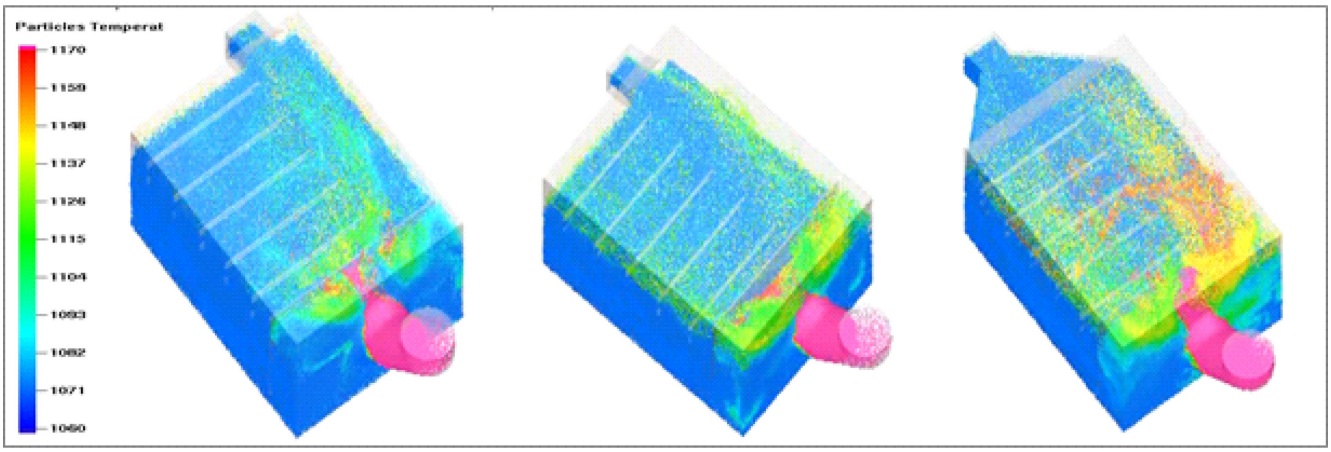


(c) temperature change at 20, 30, 40, and 50s

Fig. 6. Fluidization, particle mixing and temperature change in a F-RH FBHE with division wall (FA = 2.16 kg/s).



particle mixing with
(a) division wall, (b) expanded(30%) division wall, (c) centered exit line



temperature change with
(d) division wall, (e) expanded(30%) division wall, (f) centered exit line

Fig. 7. Particle mixing and temperature change at an early stage of particle inflow in a F-RH FBHE with modified shape (FA = 2.16 kg/s).

확보하기 위한 격막(division wall)의 높이를 기존에 비해 30% 증대시켰을 경우와(Fig. 3(b)) 이에 추가하여, 열교환 후 연소로로 순환 연계되는 입자 출구 라인을 점진적으로 면적이 감소하는 형태로 중앙에 위치시켰을 경우(Fig. 3(c))의 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 특히, FBHE로 고온의 입자가 주입되는 초기에 입자 혼합의 불균일성과 열교환 튜브의 온도상승이 일어나는 것을 고려해, 고온의 입자가 주입되는 초기, 약 20초 내의 입자 혼합과 온도분포 변화를 고찰하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 격막의 높이를 확장한 경우(Fig. 7(b)), 확장 전(Fig. 7(a))에 비해 입자 흐름이 비교적 균일하게 분포하고 있으며, 확장 후 온도 분포(Fig. 7(e)) 또한 확장 전(Fig. 7(d))에 비해 고르게 분포하는 것으로 해석되었다. 이는 격막 높이를 높임으로써 고온 입자가 머무는 사전 혼합 영역의 부피가 커짐으로써 입자의 사전 혼합에 따른 균일성이 증가하였음을 의미한다. 그러나, Fig. 6에서 고찰한 바와 같이, 사전 혼합 영역의 부피가 증가하더라도 입자의 출구가 비대칭으로 입자 흐름방향의 우측에 위치함으로써 우측으로의 편류 발생과 더불어, 온도분포의 치우침이 발생하는 것으로 해석되었다.

한편, Fig. 7(c)와 (f)에 나타낸 바와 같이, 격막의 확장과 더불어 입자의 출구를 중앙에 설치했을 경우의 입자 혼합 및 온도분포는 기존 격막만 있는 경우에 비해 훨씬 개선되는 것으로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이, 실포트로부터 고온의 입자가 주입되는 초기임에도 불구하고 비교적 고르게 유동화 영역을 지나서 출구로 배출되는 형태를 띄고 있어 사전 혼합 증대의 영향과 편류 흐름의 감소 영향을 모두 나타내는 것으로 해석되었다.

결과적으로, 실포트로부터 FBHE로 유입되는 고온의 입자들의 균일한 혼합을 통해 유동층 내의 국부적 온도상승에 의한 비유동화 및 열교환 튜브군의 고온 손상 방지를 위해서는 입자의 사전 혼합 영역을 충분히 확보하고 입자 흐름 방향으로 대칭적 배출라인을 갖도록 하는 구조개선이 가장 적합한 대안으로 제시되었다.

4. 결 론

국내 D-순환유동층 보일러의 유동층 외부열교환기(F-RH FBHE)에 대한 운전 불안정성을 야기하는 원인을 파악하고, 바라쿠다 시뮬레이션을 통한 해석을 통해 원인을 해소하기 위한 방안에 대해 제시하였다.

D-순환유동층 보일러의 F-RH FBHE는 고온의 입자가 실포트로부터 주입될 경우, 충분한 유속을 주입하는 경우에도 불구하고 고온의 입자 편류가 발생하며, 이로 인한 열교환 튜브군의 온도상승이 나타나 고온의 튜브 손상을 가져올 수 있는 것으로 나타났다. 이에 바라쿠다 시뮬레이션을 통한 유동화 정도 및 입자 혼합, 그리고 온도 분포에 대한 해석을 수행하였다. F-RH FBHE의 경우, 유동화 속도를 0.3 m/s에서 0.7 m/s까지 증가시킴에 따라 편류 및 온도 불균일성은 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 입자 배출라인의 비대칭 치우침으로 입자 흐름의 편류 및 온도 불균일성은 완전하게 해소되지 않는 것으로 나타났다. FBHE 내 고온의 입자가 유입되는 입구 영역에 격막(division wall)을 통한 사전 혼합 영역을 두었을 경우, 유입되는 고온의 입자가 열교환 튜브로의 직접 접촉을 피할 수 있으며, 편류의 영향도 더욱 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 사전 혼합을 위한 영역의 부피를 증가시키는 경우 입자 혼합 및 온도분포는 더욱 균일하게 나타남을 고찰할 수 있었다. 더불어, FBHE 내에 격막 및 입자의 배출라인의 대칭적 구조를 갖게 하는 경우, 입자 혼합의 불균일성과 입자 흐름의 편류가 상당부분 해소되는 것으로 나타나, 상기에 언급된 FBHE의 운전 불안정성을 해소할 수 있을 것으로 기대되었다.

Acknowledgments

이 논문은 한국동서발전(주)의 기술지원 요청으로 수행된 기술해석으로 한국동서발전(주)의 연구지원에 대한 감사를 드립니다.

Nomenclature

U_f : Fluidizing velocity [m/s]
U_{mf} : Minimum fluidizing velocity [m/s]
U_o : Superficial Velocity [m/s]
ρ : Particle density [m^3/kg]
φ : Particle sphericity [-]

Abbreviation

1-D : First-sealpot's Downleg
1-L : First-sealpot's Liftleg
2-D : Second-sealpot's Downleg
2-L : Second-sealpot's Liftleg
3-D : Third-sealpot's Downleg
3-L : Third-sealpot's Liftleg
ACV : Ash Control Valve
CFB : Circulating Fluidized Bed
CPFD : Computational Particle Fluid Dynamics
Evap. : Evaporator
FBAC : Fluidized Bed Ash Cooler
FBHE : Fluidzied Bed Heat Exchanger
F-RH : Final Reheater
F-SH : Final Superheater

References

1. Lee, S. H., Lee, T. H., Jung, S. M. and Lee, J. M., "Economic Analysis of a 600 mwe Ultra Supercritical Circulating Fluidized Power Plant Based on Coal Tax and Biomass Co-combustion Plans," *Renew. Energy*, **138**, 121-127(2019).
2. IEA-FBC TCP, "Developments in Fluiidzied Bed Conversion During 2011~2016," *Country Report*, edited by Jongmin Lee, KEPCO RI, Korea(2017).
3. Lee, S. H. and Lee, J. M., "Introduction and Current Status of Ultra Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler," *KEPCO Journal*, **2**(2), 211-222(2016).
4. Lee, J. M., Kim, J. S. and Kim, J. J., "Evaluation of the 200 MWe Tonghae CFB Boiler Performance with Cyclone Modification," *Energy*, **28**, 111-118(2003).
5. 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 Chem. Eng. Res*., **38**(4), 516-522(2000).
6. Rogalev, N., "A Survey of State of Art Development of Coal Fired Steam Turbine Power Plant Based on Advanced Ultrasupercritical Steam Technology," *Contemporary Engineering Science*, **7**(34), 1807-1825(2014).
7. Wang, L., Yang, D. Shen, Z., Mao, K. and Long, J., "Thermal-hydraulic Calculation and Analysis of a 600 MW Supercritical Circulating Fluidized Bed Boiler with Annular Furnace," *Applied Thermal Engineering*, **95**, 42-52(2016).
8. Lee, J. M., Kim, D. W., Park, K. I. and Kim, S. M., "Performance Analysis of Cyclone and Fludized Bed External Heat Exchanger Through Barracuda Simulation," *23th International Conference on FBC*, Spring, Korea, 1171-1177(2018).
9. Abbasi, A., Ege, P. E. and Lasa, H., "CPFD Simulation of a Fast Fluidized Bed Steam Coal Gasifier Feeding Section," *Chemical Engineering Journal*, **174**, 341-350(2011).
10. Clark, S. M. and Snider, D. M. and Fletcher, R. P., "Multiphase Simulation of a Commercial Fluidized Catalytic Cracking Regenerator," *AIChE 2012 Annual Meeting,* Pittsburgh, Pennsylvania, USA(2012).
11. Williams, A. K., "Industrial Applications of CFD for Clean Coal Plant Design," *NETL Workshop on Multiphase Flow Science*, August, USA(2013).
12. Wang, B. and Yu, A. B., "Numerical Study of the Gas-liquid-solid Flow in Hydrocyclones with Different Configuration of Vortex Finder," *Chemical Engineering Journal*, **135**, 33-42(2008).
13. Pham, H. H., Lim, Y. I., Han, S. G., Lim, B. S., Ko, H. S., "Hydrodynamics and Design of Gas Distributor in Large-scale Amine Absorbers Using Computational Fluid Dynamics," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 1073-1082(2018).
14. Mendoza, J. A. and Hwang, S. W., "Tubular Reactor Design for the Oxidative Dehydrogenation of Butene Using Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 2157-2163(2018).
15. Wei, L., Lu, Y., Zhu, J., Jiang, G., Hu, J., and Teng, H., "Effect of Cohesive Powders on Pressure Fluctuation Characteristics of Binary Gas-solid Fliudized Bed," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 2117-2126(2018).
16. Wen, C. and Yu, Y., "Mechanics of Fluidization," *Chemical Engineering Progress Symposium*, 100-111(1966).
17. Ergun, S., "Fluid Flow Through Packed Columns," *Chemical Engineering Progress*, 48-89(1949).
18. CPFD Software, LLC, "Agglomeration Model," *Barracuda VR Series 15 User Manual*, 68-70(2013).