

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.11.861>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

원추형 유동층 연소기의 수력학적 특성 및 열전달에 항력 모델이 미치는 영향에 대한 연구

강승모* · Hamada Abdelmotalib*** · 고동국** · 박외철* · 임익태***†

* 부경대학교 소방공학과, ** 전북대학교 대학원 기계공학과, *** 전북대학교 기계설계공학부

Effects of Drag Models on the Hydrodynamics and Heat Transfer in a Conical Fluidized Bed Combustor

Seung Mo Kang*, Hamada Abdelmotalib***, Dong Guk Ko**, Woe-Chul Park*** and Ik-Tae Im***†

* Dept. of Fire-fighting Engineering, Pukyong Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Chonbuk Nat'l Univ.,

*** Dept. of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received April 6, 2015 ; Revised August 17, 2015 ; Accepted September 8, 2015)

Key Words: Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Fluidized Bed Combustor(유동층 연소기), Heat Transfer Coefficient(열전달 계수), Drag Model(항력 모델)

초록: 본 연구에서는 서로 다른 항력 모델이 원추형 유동층 연소기 내의 수력학적 특성과 열전달 현상에 미치는 영향에 대해, 입자상 유동에 대한 분자운동론을 적용한 오일러-오일러 모델을 사용하여 수치해석적으로 연구하였다. Gidaspow 항력 모델과 Syamlal-O'Brien 항력 모델에 대해 유입 공기의 속도와 입자의 크기를 변화시키면서 연소기 내의 압력강하나 베드 팽창률 및 벽과 베드 사이의 열전달 계수의 변화를 조사하였다. 그 결과 베드의 팽창률은 속도가 증가함에 따라 커졌으며 압력강하는 속도의 증가에 따라 감소하였다. 벽과 베드 사이의 열전달 계수는 유입 속도가 증가하면 증가하고 입자의 크기가 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 베드의 팽창률이나 압력 강하와 같은 수력학적 특성은 항력 모델에 큰 영향을 받지 않았으나 열전달 계수는 항력 모델에 따라 차이가 나타났다.

Abstract: In this study, wall to bed heat transfer and hydrodynamic characteristics in a conical fluidized bed combustor was investigated using computational fluid dynamics method. A two-fluid Eulerian-Eulerian model was used with applying the kinetic theory for granular flow(KTGF). The effects of the two drag models, Gidaspow and the Syamlal-O'Brien model, different inlet velocities($1.4U_{mf} \sim 4U_{mf}$) and different particle sizes on the hydrodynamics and heat transfer were studied. The results showed that the hydrodynamic characteristics such as bed expansion ratio and pressure drop were not affected significantly by the drag models. But the heat transfer coefficient was different for the two drag models, especially at lower gas inlet velocities and small particle sizes.

- 기호설명 -

A : 식 (4)에 나타나는 계수
 a : 열전도율 비, 식 (7)
 B : 식 (4)에 나타나는 계수

b : 식 (7)에 사용된 상수
 C_D : 항력계수
 c_p : 정압비열
 d : 지름
 h : 대류열전달계수
 k : 열전도율
 Nu : 너셀(Nusselt) 수

† Corresponding Author, itim@jbnu.ac.kr

Pr	: 프란틀(Prandtl) 수
R	: 베드 팽창률
Re_s	: 레이놀즈(Reynolds) 수
T	: 온도
U	: 공기 유입 속도
\vec{v}	: 속도벡터
$v_{r,s}$: 식 (4)로 주어지는 함수
x	: 가로방향 좌표
z	: 세로(축)방향 좌표

그리스문자

β	: 운동량 교환계수
γ	: 식 (7)에 사용된 함수
ϵ	: 체적분율
μ	: 점성계수
ρ	: 밀도

하첨자

b	: 베드
g	: 기체
m	: 체적분율을 고려한 평균
mf	: 최소 유동화 값(Minimum fluidization)
pen	: 침투이론에 의한 값
s	: 고체 입자 또는 초기 정지 상태

1. 서 론

화석연료의 고갈이 현실적으로 다가옴에 따라 최근 세계적으로 신재생에너지 자원에 대한 관심이 증가하고 있다. 바이오매스(Biomass)와 고형 쓰레기는 잠재적인 신재생에너지 자원이며 활용이 쉬운 다른 형태의 에너지원으로의 전환이 가능하다.⁽¹⁾ 산림자원과 농산 퇴적물 등의 바이오매스는 생물학적 및 열화학적 공정을 통해 도시 고형 쓰레기에 비해 효율적으로 상업용 에너지원으로의 전환이 가능하다.⁽²⁾ 유동층 연소기(Fluidized bed combustor, FBC)는 다양한 연료의 사용이 가능하고, 기체-고형입자의 혼합이 효과적으로 이루어지며 배기가스를 안정적으로 제어할 수 있는 장점으로 인해 바이오매스나 고형 쓰레기를 이용하는 데 널리 사용되고 있다.⁽³⁾ 최근 원추형의 유동층 연소기가 거의 모든 고체연료 즉 석탄이나 농산물 잔류물 및 고형 쓰레기를 다른 에너지로 변환시킬 수 있는 가장 효과적이고 친환경적인 변환장치로 알려지고 있어 연구자들의 주목을 받

고 있다. 따라서 원추형의 유동층 연소기는 현재 사용되고 있는 원통형 연소기를 대체하는데 가장 적합한 연소기라고 생각된다.

유동층 연소기를 최적으로 설계하고 제어하기 위해서는 격렬하게 움직이는 고형입자의 운동과 입자와 입자의 충돌에 의한 복잡한 유동 및 열전달 현상을 이해하는 것이 매우 중요하다. 따라서 유동층 연소기 내의 수력학적 특성과 열전달 특성에 관한 연구가 많이 진행되어 왔으며 현재도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 베드(Bed)에서 벽 또는 벽에서 베드로의 열전달은 유동층 연소기의 열적 설계에서 가장 중요한 부분이며 이와 관련된 실험적 또는 해석적 연구가 많이 진행되어 왔다.⁽⁴⁻⁸⁾ 또한 지난 수십 년 동안 베드에서 벽으로의 열전달과 관련된 경험적인 모델이 제안되어 왔다.⁽⁹⁾ 그러나 경험적 모델은 실험 데이터를 바탕으로 하고 있어 실험에서 고려한 변수의 범위 내에서만 유용하다. 경험적 모델의 문제점은 최근 많이 이용되고 있는 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD)을 이용한 연구⁽¹⁰⁻¹²⁾에 의해 보완되고 있다. 최근의 컴퓨터의 성능향상과 수치기법 및 알고리즘의 개발에 의해 CFD를 이용하여 모래와 기체의 다상유동을 해석할 수 있게 되었으며 그에 따라 유동층 연소기 내의 기체와 고체 입자의 복잡한 거동을 분석할 수 있게 되었다.⁽¹²⁾

원추형 유동층 연소기 내의 열전달과 수력학적 특성에 관한 연구는 원통형 유동층 연소기에 대한 연구에 비해 적다.⁽¹³⁾ Sirisomboon 등⁽¹⁴⁾은 바이오매스를 연료로 하는 원추형 유동층 연소기 내에서의 축 방향 온도 분포와 기체의 농도를 분석하였다. 연소기 내로 공급된 과잉 공기는 연소기의 축 방향 온도분포에는 큰 영향을 미치지 않는 반면 일산화탄소와 산화질소(NO_x)의 농도에는 많은 영향을 주었다. Kaewklum 등⁽³⁾은 원추형 유동층 연소기 내로 유입되는 공기의 유입 방향에 따른 수력학적 특성에 대해 연구하였다. 그들은 최소 유동화 속도 (Minimum fluidization velocity)와 그에 해당하는 압력 강하에 대한 경험적 식을 도출하였다. 원추형 유동층 연소기 내의 유동 현상에 대한 또 다른 연구로서 Wiens 와 Pugsley⁽¹⁵⁾의 연구가 있다. 그들은 서로 다른 베드 재료와 가스 유입 속도에 따른 수력학적 특성을 실험적으로 관찰하였다. 그들은 시간에 따라 촬영한 이미지를 통해 연소기 내에서 발달하는 버블의 형태에 대해 분석하였으며 그 결과 가스 유입에 따라 형성되는 버블은 크게 두 가지 형태, 즉 입자의 침투가 깊지 않은 구형 버블(Spherical bubbles)과 입자

의 침투에 의해 갈라지는 버블(Penetrated bubbles)로 나눌 수 있다는 것을 확인하였다.

원추형 유동층 연소기의 연소 현상에 대한 연구는 비교적 많이 보고된 반면 기체의 수력학적 특성에 관한 연구는 앞에서 검토한 연구 외에는 찾기 어렵다. 특히 수력학적 특성과 관련한 열전달 현상에 대한 연구는 거의 보고된 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 원추형 유동층 연소기에 대해 유동 현상과 연소기 벽과 베드 사이의 열전달에 대해 전산 유체역학을 사용하여 연구하였다. 특히 입자에 작용하는 항력 모델에 따른 유동과 열전달 특성을 분석하였다. 모래와 가스로 이루어진 다상 유동을 해석하기 위해서 오일러-오일러 모델(Eulerian-Eulerian model)을 사용하였으며 입자의 거동은 입자상 유동에 대한 운동론(Kinetic theory for granular flow, KTGF)을 적용하여 해석하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 오일러-오일러 접근방법을 사용하여 원추형 유동층 연소기 내의 수력학적 및 열전달특성을 분석하였다. 이 모델은 연소기 내의 고체 입자와 가스를 모두 연속체로 가정하고 고체 입자에 대해 운동론(KTGF)을 적용하여 해석한다. 이 때 기체를 1차상(Primary phase)으로 고체 입자를 1차상에 분산된 2차상으로 간주한다. 입자상 유동에 대한 운동론에서는 입자 사이의 점성력, 입자 압력 및 입자간 충돌 빈도 등을 입자상 온도(Granular temperature)를 사용하여 나타낼 수 있다.

수치해석에서 속도와 압력의 수정은 SIMPLE 알고리즘⁽¹⁶⁾을 사용하였다. 해석에는 상용 전산유체역학 프로그램인 FLUENT V6.3⁽¹⁷⁾을 사용하였다. Fig. 1에 원추형 유동층 연소기에 대한 2차원 형상을 초기 베드의 형태 및 계산에 사용한 격자계와 함께 나타내었다. 실제 사용되고 있는 것보다 연소기의 크기가 작는데 이것은 실험을 위해 제작한 것과 동일한 형상과 크기를 해석대상으로 하였기 때문이다. 또 실험을 위한 연소기의 형상과 크기를 결정할 때에는 기존 연구^(4,8,10)를 참고하였다. 공기와 모래가 각각 유동화 기체와 베드 소재로 사용되었다. 초기 베드 층의 높이 z_s 는 20 cm로 하였다. Table 1에 계산에 사용한 공기와 모래의 물성치를 나타내었으며 Table 2에 수치해석과 관련된 설정 값을 나타내었다.

Table 1 Properties and characteristics of air and quartz sand used in the simulations

Air properties	
Density(kg/m ³)	1.2
Thermal conductivity(W/m·K)	0.025
Specific heat (J/kg·K)	1005
Viscosity (N·s/m)	1.86×10 ⁻⁵
Sand properties	
Density(kg/m ³)	2520
Bulk bed density(kg/m ³)	1540
Thermal conductivity(W/m·K)	0.25
Specific heat(J/kg·K)	800
Mean particle size(μm)	560, 850
Solid volume fraction	0.4

Table 2 Parameters used in the simulations

Flow type	Laminar
Time step used	0.00025 s
Convergence criteria	10 ⁻³
Under relaxation factors	0.5 for pressure, 0.4 for momentum and 0.2 for volume and granular temperature
Maximum solid packing volume fraction	0.63
Discretization scheme for advection terms	Second-order upwind
Outlet condition	Atmospheric pressure
Superficial gas velocity	1.4 U_{mf} -4 U_{mf}

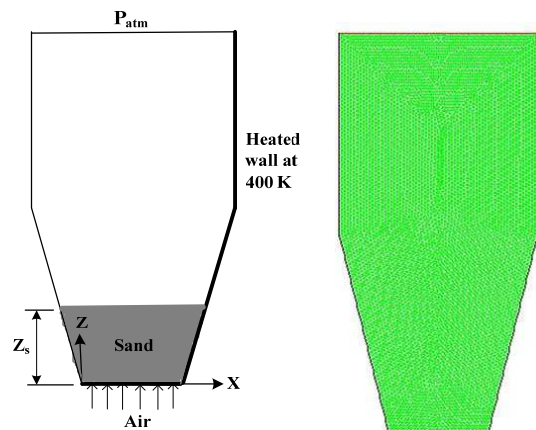


Fig. 1 Schematic of a conical fluidized bed combustors considered in this study(Left) and computational grid used in the simulations(Right)

2.2 지배방정식

오일러-오일러 모델에서는 기체와 입자 상 (Phase)에 대해 질량 보존에 대한 방정식과 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 각각 적용하여 해석한다. 입자의 크기가 작기 때문에 입자에 작용하는 양력의 효과는 무시하였다. 오일러 모델에서 풀어야 하는 각 상에 대한 보존방정식은 참고 문헌(7,18,19)에 정리되어 있으므로 여기서는 기술하지 않았다. 오일러-오일러 모델에서는 지배 방정식을 닫힌 문제로 만들기 위해 고체 입자에 대한 운동론을 적용한 식과 입자의 항력에 대한 식과 같은 보조 방정식이 필요하며 이에 대해서는 참고 문헌(18)과 Lun 등(20)의 문헌을 참고할 수 있다. 보조 방정식 중 요동 운동 에너지(Kinetic fluctuation energy)에 대한 방정식으로는 편미분 방정식 모델(Partial differential equation model)을 사용하였으며 벽에 대한 입자의 반사를 나타내는 계수(Specularity coefficient)에는 미끄러짐이 없다고 가정하여 1.0을 사용하였다. 고체 입자는 불완전 탄성체로 간주하여 반발계수(Coefficient of restitution)로 0.9의 값을 사용하였다.

기체와 고체 입자 사이의 운동량 교환계수 β 는 식 (1)의 Syamlal-O'Brien 모델과 식 (2), (3)으로 주어지는 Gidaspow 모델의 두 가지 항력 모델(21)을 사용하였다.

$$\beta = \frac{3}{4} \frac{\epsilon_s \epsilon_g \rho_g}{v_{r,s}^2 d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (1)$$

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\epsilon_g \epsilon_s \rho_g}{d_s} \frac{|\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\epsilon_g^{-2.65}}, \epsilon_g < 0.8 \quad (2)$$

$$\beta = 150 \frac{\epsilon_g^2 \mu_g}{\epsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\epsilon_s \rho_g}{d_s} \frac{|\vec{v}_g - \vec{v}_s|}{\epsilon_g}, \epsilon_g \geq 0.8 \quad (3)$$

여기서

$$v_{r,s} = 0.5(A - 0.06Re_s) + \sqrt{(0.06Re_s)^2 + 0.12Re_s(2B - A) + A^2} \quad (4)$$

$$C_D = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s/v_{r,s}}} \right)^2 \quad (5)$$

이며 $A = \epsilon_g^{4.14}$, B 는 $\epsilon_g \leq 0.85$ 일 때 $B = 0.8\epsilon_g^{1.28}$, $\epsilon_g > 0.85$ 일 때 $B = \epsilon_g^{2.65}$ 이다. 또 Re_s 는 고체 입자의 크기를 기준으로 한 Reynolds 수로서 $Re_s = \rho_g d_s \epsilon_g |\vec{v}_g - \vec{v}_s| / \mu_g$ 와 같이 정의된다.

고체 입자의 열전도율을 유동층 연소기 내의 입자의 접촉 상태에 따라 다르게 나타낸다. 오일

러 모델에서는 방정식의 수학적 묘사를 위하여 입자상과 기체상의 열전도율을 전체 체적 열전도율과 구별하는 것이 필요하다. 이에 대한 식은 Syamlal과 Gidaspow(21)에 의해 제안되었으며 Kuipers 등(8)도 이를 사용하였다. 기체와 고체 입자에 대한 유효 열전도율은 각각 다음 식과 같다.

$$k_{g,eff} = \left(\frac{1 - \sqrt{\epsilon_s}}{\epsilon_g} \right) k_g \quad (6)$$

$$k_{s,eff} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_s}} [ab + (1-b)\gamma] k_g \quad (7)$$

여기서 γ 는 고체입자와 기체의 열전도율의 비 a 와 각 상의 체적분율의 함수(8,21)로 주어지며 b 는 상수로서 7.26×10^{-3} 이다. 고체 입자와 공기 사이의 열전달 계수는 Gunn(22)이 제안한 다음 식 (8)을 사용하여 계산하였다.

$$Nu = (7 - 10\epsilon_g + 5\epsilon_g^2)(1 + 0.7Re_s^{0.2}Pr^{0.33}) + (1.33 - 2.4\epsilon_g + 1.2\epsilon_g^2)Re_s^{0.7}Pr^{0.33} \quad (8)$$

여기서 $Pr = \mu_g c_{p,g} / k_g$, $Nu = hd_s / k_g$ 이다.

2.3 경계조건 및 초기조건

Fig. 1에 나타낸 것처럼 모래는 처음부터 연소기 내에 초기 속도 없이 일정 높이 20 cm로 채워져 있으며 유동화 기체인 공기는 베드 아래에 있는 유입구를 통해 공급된다. 유입 공기의 속도는 수력학적 특성과 열전달에 유입 속도의 크기가 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2에 나타낸 범위에서 몇 가지 다른 값을 사용하였다. 연소기 내 베드 윗부분은 공기이며 가장 윗면에 대해서는 대기압 조건을 부여하였다. 오일러-오일러 모델에서는 고체 입자 층인 베드와 공기층을 모두 오일러 접근법으로 해석한다. 기체와 고체 입자는 모두 벽면에서 미끄러짐이 없다고 가정하였으며 가열된 벽면의 온도는 400 K로 일정하게 유지된다. 유입되는 기체의 온도와 초기 모래의 온도는 모두 대기온도와 같다고 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석 모델의 검증

본 해석에 앞서 해석에 사용할 격자를 결정하기 위하여 해의 격자 의존성 테스트를 실시하였다. 격자 의존성 테스트는 셀의 모양은 사각형이지만 조밀도가 서로 다른 세 가지 격자계, 즉

3240개의 셀로 이루어진 성긴 격자계, 12960개의 중간 격자계 및 35910개의 셀로 이루어진 조밀한 격자계가 사용되었다. 세 가지 격자계에 대해 20 초까지 해석을 수행한 후 모래의 축 방향 체적 분율과 압력 분포를 비교한 결과 중간 격자계와 조밀한 격자계의 결과가 거의 동일하였다. 따라서 Fig. 1에 나타난 것과 같은 중간 격자계를 사용하여 나머지 해석을 수행하였다.

해석에 사용한 모델의 타당성을 검증하기 위해 해석 결과로 얻은 베드의 팽창률을 기존에 알려진 결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 베드의 팽창률 R 은 기체 유입 후 베드의 높이와 초기 베드 높이의 비를 의미한다. 기체 유입 후 팽창된 베드의 높이는 예를 들어 Fig. 3의 첫 번째 그림의 경우 벽을 따라 올라간 고체상의 높이를 말한다. Singh 등⁽²³⁾은 차원 해석을 사용하여 다양한 입자와 연소기 형상에 대해 베드의 팽창률을 예측하기 위한 식을 수립하였다. 원추형 유동층 연소기에 대해 이 식을 사용하여 계산한 결과와 본 연구의 해석 결과를 Fig. 2에 함께 나타내었다. 유입 공기의 속도가 증가할수록 베드의 팽창률이 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 연구의 결과가 Singh 등⁽²³⁾의 식에 의한 예측 값보다 약간 작지만 본 연구에서 고려한 두 가지 항력 모델에 대해 얻은 베드의 팽창률이 Singh 등⁽²³⁾의 식으로 계산한 결과와 비교적 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 보이는 차이의 원인은 두 가지를 들 수 있는데 첫째는 차원해석이 원통형 연소기에 대해 이루어진 반면 본 연구는 원추형 연소기에 대한 것이라는 점과 둘째 Singh 등⁽²³⁾의 식이 1.8보다 작은 팽창률에 대해서는 실험결과보다 큰 값을 예측하였다는 점을 들 수 있다. 따라서 Fig. 2에서도 수치해석 값이 그들의 식에 의한 예측 값보다 작게 나타났다.

3.2 연소기내의 수력학 및 열전달 특성

Fig. 3은 공기가 유입된 후 1, 4 및 6.25초에서 고체 입자의 체적분율을 나타낸다. 위에 있는 것이 Syamlal-O'Brien 모델을 사용한 결과이며 아래 것이 Gidaspow 모델을 사용한 결과이다. 전체적으로 가운데 부분과 양쪽 벽 쪽의 체적분율이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 가운데 부분에서도 공기 버블이 형성되면서 벽면 근처를 제외하고는 고체 입자의 분

포가 불규칙하게 된다. 두 가지 항력모델에 따른 고체 입자의 체적분율 분포는 정성적으로는 유사하다고 할 수 있다.

Fig. 4는 공기가 베드를 통과하는 동안 발생하는 압력강하 Δp 를 유입 공기의 속도(U) 변화에 따라 나타낸 것이다. 유입 공기의 속도는 Table 2에 나타낸 것처럼 최소 유동화 속도(U_{mf})의 1.4배에서 4배까지 변화시켰다. 유입 속도가 일정 값 이상이 되면 압력강하는 유입 속도에 무관하게 거의 일정하게 유지된다. 그러나 원통형 반응기와 달리, 유입 속도가 베드의 정적 상태에서 안정적 팽창까지 증가하는 동안 압력강하의 최대값이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Kaewklum 등⁽³⁾의 결과와 유사하다.

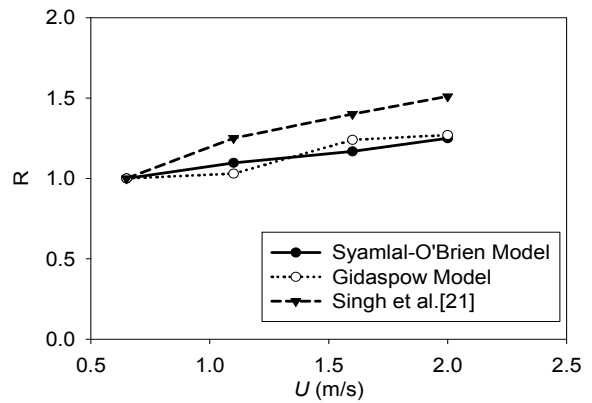


Fig. 2 Bed expansion at t=6.25 s for Syamlal-O'Brien and Gidaspow drag model

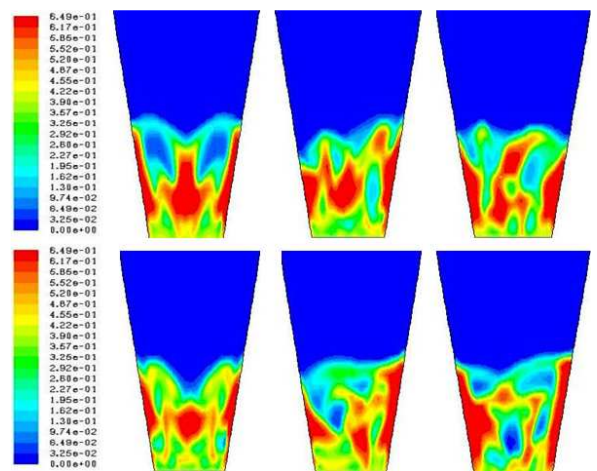


Fig. 3 Contour plots of the instantaneous solid particle volume fractions at 1, 4 and 6.25 s; Gas velocity of 1.6 m/s for the Syamlal-O'Brien (Top) and Gidaspow(Bottom) drag models

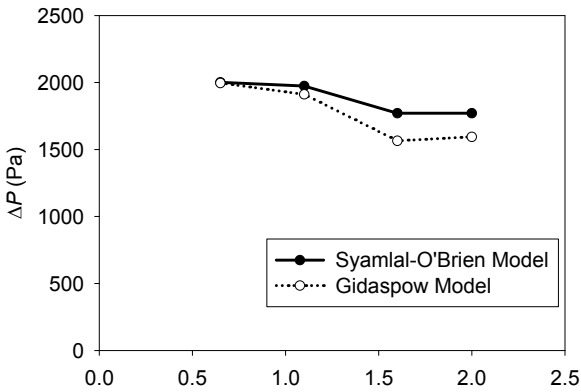


Fig. 4 Pressure drop across the bed at different gas velocities for the Syamlal-O'Brien and Gidaspow drag model, $t=6.25$ s

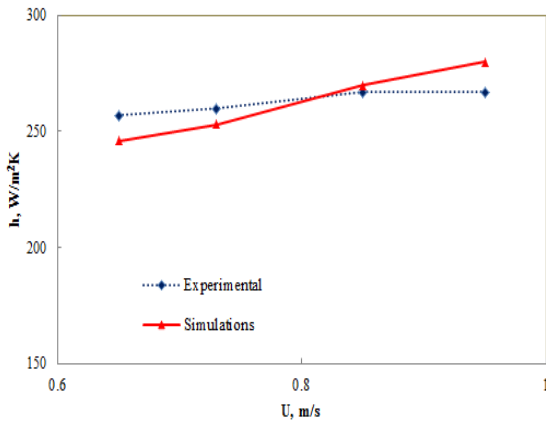
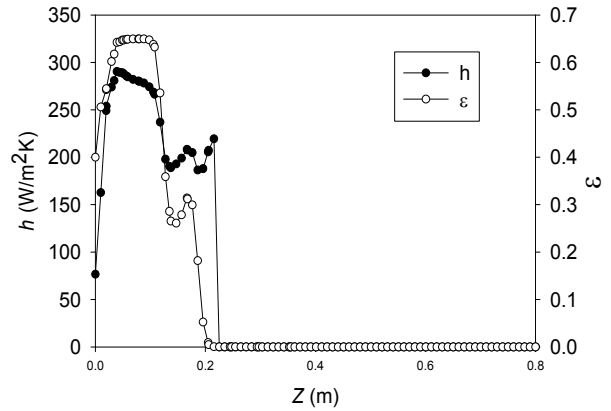


Fig. 5 Wall-to-bed heat transfer coefficient at $z=0.1$ m from simulations compared with experimental results⁽²⁴⁾

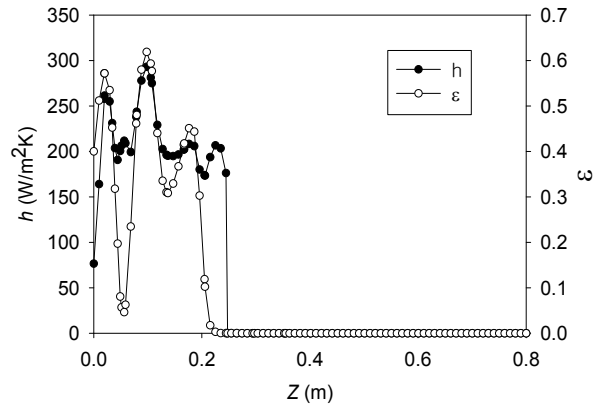
Fig. 5는 벽과 베드 사이(Wall-to-bed)의 열전달 계수를 나타낸 것으로 Syamlal-O'Brien 항력 모델을 사용하여 계산한 값을 측정 값⁽²⁴⁾과 비교하였다. 실험에 사용한 연소기 및 실험조건에 대한 자세한 내용은 문헌⁽²⁴⁾을 참고하기 바란다. 열전달 계수는 입구에서 0.1 m 높이의 벽에서의 값이며 $t=6.25$ 초에서의 결과이다. 전산 해석에서 열전달계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$h = \frac{\epsilon_g k_g \left| \frac{\partial T_g}{\partial x} \right| + \epsilon_s k_s \left| \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|}{(T_w - T_b)} \quad (9)$$

입구 유입속도의 변화에 따른 국소 열전달 계수가 시뮬레이션으로 구한 값과 측정값이 유사한 것을 확인할 수 있다.



(a) Syamlal-O'Brien drag model



(b) Gidaspow drag model

Fig. 6 Volume fractions and heat transfer coefficients near the heated wall for the Gidaspow and Syamlal-O'Brien drag models at $U=1.6$ m/s, and $t=6.25$ s

Fig. 6은 유입 공기의 속도가 1.6 m/s이고 시간이 6.25 초일 때 가열된 벽 근처에 대한 입자의 체적 분율과 열전달 계수를 함께 나타낸 것이다. 입자의 체적 분율이 높은 영역에서 열전달 계수도 높게 나타나는 것을 볼 수 있는데 이것은 공기에 비해 모래 입자가 상대적으로 높은 열전달 효과를 지니고 있음을 말해준다. 베드 윗부분의 공기 영역에서는 매우 낮은 열전달 계수가 나타나며 이것은 공기가 열전달에 대해 강한 열저항으로 작용하기 때문이다. Gidaspow 항력 모델을 사용한 경우 결과에 진동이 더 많은 점을 제외하고는 두 항력 모델에 대해서는 의미 있는 차이가 발견되지 않았다.

공기의 유입 속도가 열전달 계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유입 속도를 바꾸면서 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Gidaspow 모델의 경우 유입 속도가 증가하면

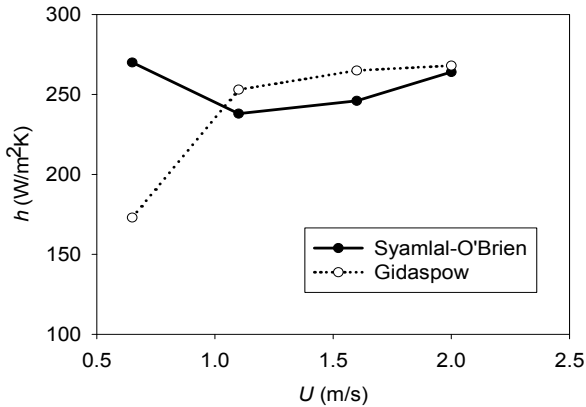
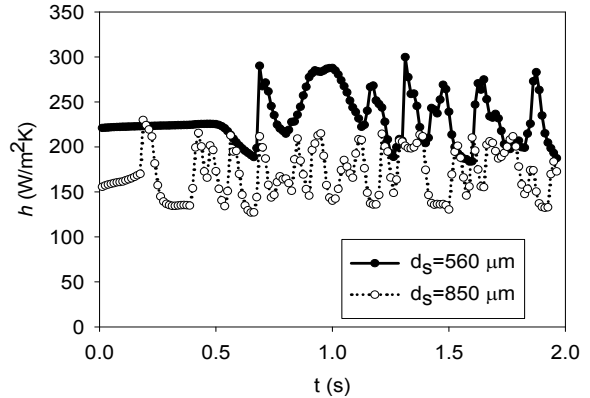


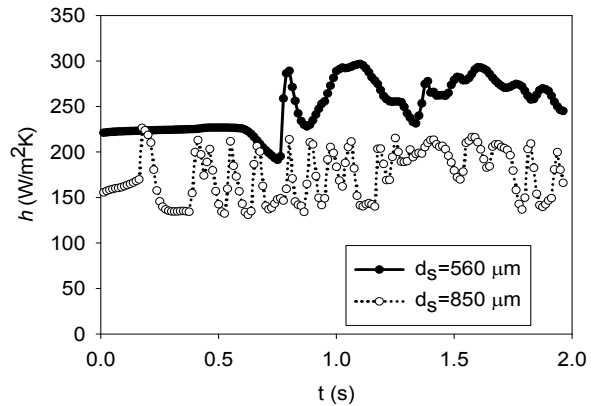
Fig. 7 Effect of inlet gas velocity variation to the bed-to-wall heat transfer coefficients for the Gidaspow and Syamlal-O'Brien drag model, $t=6.25$ s and $z=0.1$ m

열전달 계수도 증가하는 경향을 보인다. 그러나 Syamlal-O'Brien 모델의 경우에는 열전달 계수가 감소하다가 유입 속도가 1.0 m/s 이상부터 증가한다. 속도가 증가함에 따라 열전달 계수가 증가하는 것은 높은 속도에 의해 고체 입자가 더 잘 떠 있으면서 혼합도 잘 이루어지기 때문으로 보인다. 유입 속도가 0.6 m/s로 낮은 경우에는 두 항력 모델에 대해 열전달 계수의 차이가 비교적 크다. 이것은 두 항력 모델이 최소 유동화 속도 이상에 대해 제안되어 있기 때문으로 생각된다. 유입 속도가 1~2 m/s에서는 두 항력 모델에 대한 값이 약간 차이가 나지만 2 m/s에서는 열전달 계수 값이 거의 같아지는 것을 볼 수 있다.

두 항력 모델에 대해 입자의 크기가 열전달 계수에 미치는 영향은 Fig. 8에 나타내었다. 입자의 크기는 560 μm 와 850 μm 이며 공기 유입구 상부 0.1 m 위치에서의 열전달 계수를 나타내었다. 유입 공기의 속도는 1.6 m/s이다. 두 항력 모델에 대해 모두 입자의 크기가 작을 때 열전달 계수가 높은 것을 볼 수 있다. 입자의 지름이 크면 기공률이 커지기 때문에 입자 사이의 공기가 열전달을 방해하게 된다. 따라서 입자가 작은 경우에 비해 큰 경우의 열전달률이 낮게 나타나게 된다. 이러한 특성은 항력 모델에 관계없이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 항력 모델에 따른 시간 평균 열전달 계수의 차이는 Fig. 9에서 확인할 수 있다. Fig. 8을 통해 예측할 수 있듯이 Syamlal-O'Brien 모델의 경우에 더 높은 열전달 계수를 예측하는 것을 볼 수 있으며 입자의 크기가 작을수록 차이가 크게 나타났다. 그러나 입자의 크기가



(a) Gidaspow drag model



(b) Syamlal-O'Brien drag model

Fig. 8 Time variational heat transfer coefficient for different particle sizes and drag models

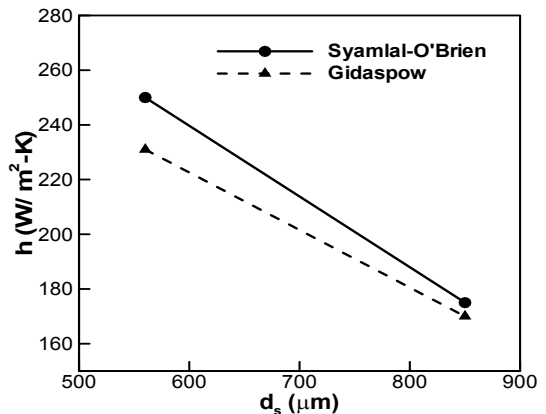


Fig. 9 Effect of particle size on predicted heat transfer coefficients for the Gidaspow and Syamlal-O'Brien drag model

작은 경우에도 그 차이는 7.6%로 큰 차이가 나지는 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 원추형 유동층 연소기에서 유동

특성과 벽과 베드 사이의 열전달 현상을 전산유체역학을 사용하여 해석하였다. 다상 유동을 해석하기 위하여 입자상 유동에 대한 분자 운동론을 적용한 오일러-오일러 접근방법을 사용하였다. 서로 다른 두 가지 항력 모델, 즉 Gidaspow 및 Syamlal-O'Brien 항력 모델이 유동 특성과 열전달 계수에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과 고체 입자의 체적 분율 분포나 축 방향 압력 강하와 같은 유동 특성은 항력 모델에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 열전달 계수는 항력 모델에 따라 차이가 있었으며 시간 평균값은 Syamlal-O'Brien 모델을 사용한 경우가 Gidaspow 모델을 사용한 경우의 값보다 더 크게 나타났다. 또 열전달은 주로 베드 층을 통해 이루어지며 유입 기체의 속도가 증가하거나 입자의 크기가 작아지면 열전달 계수가 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌 (References)

- (1) Kendry, M. P., 2008, "Energy Production from Biomass (part 2), Conversion Technologies," *Bioresource Technology* Vol. 83, pp. 47~54.
- (2) Wang, L., Weller, L. C., Jones, D. D. and Hanna, A. M., 2008, "Contemporary Issues in Thermal Gasification of Biomass and Its Application to Electricity and Fuel Production," *Biomass and Bioenergy*, Vol. 32, pp. 573~581.
- (3) Kaewklum, R., Kuprianov, V. I. and Douglas L. P., 2009, "Hydrodynamics of Air-Sand Flow in a Conical Swirling Fluidized Bed: A Comparative Study Between Tangential and Axial Air Entries," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 2999~3006.
- (4) Patil, R. S. and Pandey, P. M., 2011, "Parametric Studies and Effect of Scale-Up on Wall to Bed Heat Transfer Characteristics of Circulating Fluidized Bed Risers," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 35, pp. 485~494.
- (5) Gupta, A. V. and Nag, P. K., 2002, "Bed to Wall Heat Transfer Behavior in a Pressurized Circulating Fluidized Bed," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3429~3436.
- (6) Kalita, P., Mahant, P. and Saha, K. U., 2013, "Some Studies on Wall to Bed Heat Transfer in a Pressurized Circulating Fluidized Bed Unit," *Procedia Engineering*, Vol. 56, pp. 16~172.
- (7) Armstrong, L. M., Gu, S. and Luo, K. H., 2010, "Study of Wall to Bed Heat Transfer in a Bubbling Fluidized Bed Using the Kinetic Theory of Granular Flow," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4949~4959.
- (8) Kuipers, J. A. M., Prins, W. and Swaaij, W. P., 1997, "Numerical, Calculation of Wall to Bed Heat-Transfer Coefficients in Gas Fluidized Beds," *AIChE Journal*, Vol. 38, pp. 1079~1091.
- (9) Yusuf, R., Melaaen, M. C. and Mathiesen, V., 2005, "Convective Heat and Mass Transfer Modeling in Gas Fluidized Beds," *Chemical Engineering Technology*, Vol. 28, pp. 13~24.
- (10) Yusuf, R., Halvorsen, B. and Melaaen, C. M., 2012, "An Experimental and Computational Study of Wall to Bed Heat Transfer in a Bubbling Gas-Solid Fluidized Bed," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 42, pp. 9~23.
- (11) Hou, Q. F., Zhou, Z. Y. and Yu, A. B., 2009, "Computational Study of Heat Transfer in Bubbling Fluidized Beds with Geldert a Powder," Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Australia 9-11.
- (12) Almuttahir, A. and Taghipour, F., 2008, "Computational Fluid Dynamics of a Circulating Fluidized Bed Under Various Fluidization Conditions," *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp. 1696~1709.
- (13) Kaewklum, R. and Kuprianov, V. I., 2008, "Theoretical and Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of Fluidization in Air-Sand Conical Beds," *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, pp.1471~1479.
- (14) Sirisomboon, K., Kuprianov, V. I. and Arromdee, P., 2010, "Effects of Design Features on Combustion Efficiency and Emission Performance of a Biomass-Fuelled Fluidized-Bed Combustor," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 49, pp. 270~277.
- (15) Wiens, J. and Pugsley, T., 2006, "Tomographic Imaging of a Conical Fluidized Bed of Dry Pharmaceutical Granule," *Powder Technology*, Vol. 169, pp. 49~59.
- (16) Patankar, S., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, Washington, D.C.
- (17) Fluent is a product name by Ansys, Ansys Inc., Southpointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
- (18) 2003, Fluent 6.1 User's Guide Volume 3, Chap. 22, Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.
- (19) Patil, D. J., Smit, J., Annaland, M. and Kuipers, J. A. M., 2006, "Wall to Bed Heat Transfer in Gas-Solid Bubbling Fluidized Beds," *AIChE Journal*, Vol. 52, pp.

- 58~74.
- (20) Lun, C., Savage, S., Jeffrey, D. and Chepurniy, N., 1984, "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.140, pp. 223~256.
- (21) Syamlal, M. and Gidaspow, D., 1985, "Hydrodynamics of Fluidization: Prediction of Wall-To-Bed Heat Transfer Coefficients," *AIChE Journal*, Vol. 31, pp. 127~135.
- (22) Gunn, D. J., 1978, "Transfer of Heat or Mass to Particles in Fixed and Fluidized Beds," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 21, pp. 467~476.
- (23) Singh, R. K., Suryanarayana, A. and Roy, G. K., 1999, "Prediction of Bed Expansion Ratio for Gas-Solid Fluidization in Cylindrical and Non-Cylindrical Beds," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 79, pp. 51~55.
- (24) Im, I.-T., Abdelmotalib, H. M., Kim, M. S., Park, C. W., "A Study on Wall to Bed Heat Transfer in a Conical Fluidized Bed Combustor," *ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, May 25-29, 2015, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA, Book of Abstracts, Edited by Jaluria, Y. and Guo, Z., p. 295.