

복사효과를 고려한 기체-입자 직접접촉식 열교환기 해석

박재현* · 백승욱** · 권세진**

(1997년 10월 29일 접수)

Analysis of a Gas-Particle Direct-Contact Heat Exchanger with Two-Phase Radiation Effect

Jae Hyun Park, Seung Wook Baek and Se Jin Kwon

Key Words: Direct-Contact Heat Exchanger(직접 접촉식 열교환기), Gas-Particle Two Phase Flow(기체-입자 2상유동), Radiative Heat Transfer in Two Phase Media(2상 매질에서의 복사열전달)

Abstract

A direct contact heat exchanger using particle-suspended gas as a heat transfer medium is analyzed with an extended emphasis on the radiation, i. e., considering the radiation by both gas and particles. While the Runge-Kutta method is used for a numerical analysis of the momentum and energy equations, the finite volume method is utilized to solve the radiative transfer equation. Present study shows a notable effect by the gas radiation in addition to the particle radiation, especially when changing the chamber length as well as the gas and particle mass flow rate. When the gas and particle mass flow rate is raised, the gas temperature in the particle heater still increases as the gas absorption coefficient increases, which is different from the results for the small scale heat exchanger.

기호 설명	
A	: 챔버의 단면적, m^2
A_s	: 고체입자의 표면적, m^2
c	: 비열, $J/kg \cdot K$
d_p	: 입자의 지름, m
\hat{e}_x	: x-방향의 단위벡터
\vec{g}	: 중력가속도 벡터 = $-9.81\hat{e}_x$ m/s^2
h	: 기체와 입자간의 열전달 계수, $W/m^2 \cdot K$
H	: 엔탈피, J/kg
I	: 복사강도, $W/m^2 \cdot sr$
L	: 챔버 길이, m
\dot{m}	: 질량유량, kg/s
n_p	: 입자들의 수밀도(number density), Table 1

N_x	: 검사체적의 개수
N_θ	: θ -방향의 검사각도의 개수
p	: 압력, Pa
\vec{q}^R	: 복사열유속벡터, W/m^2
Q_{abs}	: 흡수효율(absorption efficiency)
Q_{ext}	: 소멸효율(extinction efficiency)
Q_{sca}	: 산란효율(scattering efficiency)
R_{air}	: 공기의 기체상수
s	: 광행로
T	: 온도, K
\vec{u}	: 속도, m/s

그리스문자

β	: 전소멸계수(total extinction coefficient) = $\kappa_g + \beta_p$, m^{-1}
---------	---

* 한국과학기술원 대학원 항공우주공학과

** 회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

- β_p : 입자소멸계수 (particle extinction coefficient), Eq. (13c), m^{-1}
- ζ : 입자들의 체적분율 (volume fraction), Table 1
- η : 질량유량비 (loading ratio), Table 1
- κ : 흡수계수 (absorption coefficient), m^{-1}
- λ : 열전도도, $W/m \cdot K$
- ρ : 밀도, kg/m^3
- σ : Stefan-Boltzmann 상수 $= 5.670 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
- σ_g : 기체농도 (gas concentration), Table 1
- σ_p : 입자농도 (particle concentration), Table 1
- σ_s : 산란계수 (scattering coefficient), m^{-1}
- Φ : 산란위상함수 (scattering angle)

하첨자

- b : 흑체
- g : 기체상
- in : 입구조건
- p : 입자상

1. 서 론

보일러, 연소기, 가스화설비 등은 보통 1000K가 넘는 배출가스를 내어놓는데, 석탄을 사용하는 노의 경우 1400K가 넘기도 한다.⁽¹⁾ 이러한 가스들은 그 자체로 상당한 양의 가용에너지를 가지므로 이들로부터의 열회수는 에너지 절약, 발전설비의 성능향상, 그리고 NOx 저감의 측면에서 상당히 중요하다.

따라서, 열회수를 위한 열교환기에 대한 연구들은 오래 전부터 활발하였으며, 관군형 (tubular type) 이나 회전형 (rotary type) 열교환기 등이 개발되어 사용되어 왔다. 하지만, 기존의 열교환기들은 오염물질에 의한 부식, 고온환경 하에서 작동의 어려움, 낮은 열전달계수 등과 같은 문제점들을 지니고 있었기 때문에 작동범위가 상당히 제한적일 수 밖에 없었는데, 최근에 이런 문제점들을 극복할 수 있는 열교환기가 제안되었다. 그것은 움직이는 고체입자들 층과 그 사이를 지나는 기체 간의 직접접촉 열교환을 이용하기 때문에 기체-입자 직접접촉식 열교환기 (gas-particle direct-contact heat exchanger) 라고 불린다.⁽²⁾

Fig. 1은 이 열교환기에 대한 개략도이다. 일정

한 폐회로를 순환하는 고체입자들에 의해서 열이 전달되는데, 입자가열부 (particle heater)에서 고체입자들이 뜨거운 배출가스에 의해 가열된 뒤, 공기예열부 (air preheater)로 들어가 자신들이 가진 열을 이용해 연소기 등으로 들어가는 공기를 예열한다. 이러한 과정은 지속적으로 반복되며, 입자들은 그들 자신의 무게에 의해 아래로 움직인다. 그리고, 기체를 아래에서 위로 쏘아 주어 입자들의 움직임과 서로 대항류가 되어, 열전달 시간이 최대가 되도록 설계되었다.

기체-입자 직접접촉식 열교환기에 대한 기존의 연구들은 복사효과를 무시하거나, 기체-입자 2상매질 중 기체장이 복사에 관여하지 않는다고 가정한 단순화된 모델을 채택하여 왔다.^(2,3) 하지만, 실제로 이 열교환기는 주로 고온에서 동작하고, 열원이 되는 배출가스들이 수증기나 이산화탄소 등을 포함하는 복사에 관여하는 매질인 경우가 많으므로 이런 단순화가 항상 적절한 것은 아니다. 알려진 바로는 고체 입자들에 의한 복사와 기체복사를 동시에 고려한 기체-입자 직접접촉식 열교환기에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

본 연구의 목적은 기체-입자 직접접촉식 열교환기에서 기체복사의 영향을 살펴보는 것으로, 일차

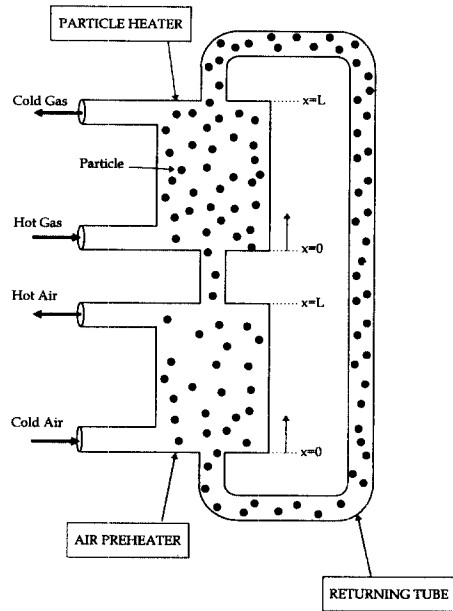


Fig. 1 Schematic diagram of direct-contact heat exchanger.

원과정과 회체 매질 등을 가정하였다. 복사효과를 고려한 기체-입자 혼상 매질에 대한 엄정한 지배방정식들이 사용되었으며, 복사전달방정식은 유한체적법, (4) 다른 보존방정식들은 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치적으로 풀었다. 기체흡수계수의 변화에 의한 기체복사의 영향이 검토되었으며, 대형 열교환기와 소형 열교환기 사이의 차이점들이 복사효과에 중점을 두고 고찰되었다. 또한, 실제 열교환기 설계의 중요한 자료가 되는 챔버길이, 입자의 크기, 챔버입구압력의 영향도 살펴보았다.

2. 보존방정식들

2.1 가정들과 모델의 정식화

본 연구에서 사용된 가정들은 다음과 같다.

1. 계는 정상상태의 일차원이다.
2. 입자들은 일정한 크기의 구형으로, 서로 독립적으로 움직인다.
3. 입자들이 충분히 커서 브라운 운동은 일어나지 않는다.
4. 입자 내부의 온도 분포는 무시할 만 하다.
5. 기체장은 이상기체이다.
6. 입자의 체적분율이 작으므로, 기체의 농도와 밀도는 같다고 볼 수 있다.

기체-입자 혼상 유동에 대한 지배방정식들은 다음과 같다. (5)

- 기체 연속방정식

$$\sigma_g u_g A = \dot{m}_g \quad (1)$$

- 입자 연속방정식

$$\sigma_p u_p A = \dot{m}_p \quad (2)$$

- 기체 운동량방정식

$$\sigma_g \frac{D\vec{u}_g}{Dt} = -\nabla p + \frac{\sigma_g}{2} (\vec{u}_p - \vec{u}_g) |\vec{u}_p - \vec{u}_g| C_D A_s n_p \quad (3)$$

- 입자 운동량방정식

$$\sigma_p \frac{D\vec{u}_p}{Dt} = \sigma_p \vec{g} - \frac{\sigma_g}{2} (\vec{u}_p - \vec{u}_g) |\vec{u}_p - \vec{u}_g| C_D A_s n_p \quad (4)$$

- 기체 에너지방정식

$$\sigma_g \frac{DH_g}{Dt} = u_g \frac{dp}{dx} + h A_s n_p (T_p - T_g) + \lambda_g \frac{d^2 T_g}{dx^2} - \nabla \cdot \vec{q}_g^r \quad (5)$$

- 입자 에너지방정식

$$\sigma_p \frac{DH_p}{Dt} = -h A_s n_p (T_p - T_g) - \nabla \cdot \vec{q}_p^r \quad (6)$$

- 이상기체의 상태방정식

$$p = \sigma_g R_{air} T_g \quad (7)$$

위 식들에 나타나는 2상매질의 관계식들은 Table 1에 정리되어 있다. (2,6) 식 (5)와 식 (6)의 기체의 복사열유속발산항, $\nabla \cdot \vec{q}_g^r$ 과 입자의 복사열유속발산항, $\nabla \cdot \vec{q}_p^r$ 는 다음 절에서 자세히 설명하기로 한다.

저항계수는 Reynolds 수에 따라 변화하며, 기체와 입자 사이의 열전달 계수는 Ranz-Marshall 관계식을 사용해서 구하였다. (2,5) 그리고, 고체입자의 물성치는 Table 2에 나타난 일정한 값들을 사용하였고, 기체의 경우에는 온도의 함수로 주어진 공기표를 사용하였다. (2)

Table 1 General thermodynamic properties of gas-particle mixtures.

Property	Definition	Unit
Number density of the particles	$n_p = \frac{\dot{m}_p / A}{\rho_p (\pi d_p^3 / 6) u_p}$	m^{-3}
Volume fraction of the particles	$\zeta = n_p \frac{\pi d_p^3}{6}$	—
Gas concentration	$\sigma_g = \rho_g (1 - \zeta)$	Kg/m^3
Particle concentration	$\sigma_p = \rho_p \zeta$	Kg/m^3
Loading ratio	$\eta = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g} = \frac{\rho_p u_p}{\sigma_g u_g}$	

Table 2 Properties of solid particle.

(a) Norton Mater Beads™

Property	Quantity
Density, ρ_p	3130kg/s
Specific heat, c_p	1057J/kg · K

(b) Stainless Steel

Property	Quantity
Density, ρ_p	8330kg/s
Specific heat, c_p	461J/kg · K

2.2 경계조건

본 연구에서는 일차원 가정을 사용하고 있기 때문에 위 벽과 아래 벽에서의 경계조건만 설정되던다. 각 상에 대해서 입구조건 (inlet condition)이 주어져야 하는데, 기체장의 경우에는 아래벽에서의 조건이 주어지고, 고체입자들의 경우에는 위벽에서의 조건이 주어져야 한다.

$$T_g(x) = T_{g,in} ; x=0 \quad (8a)$$

$$T_p(x) = T_{p,in} ; x=L \quad (8b)$$

일단 온도만 결정되면, 속도와 농도 등은 상태방정식과 각 상의 연속방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

3. 복사열전달

3.1 복사전달방정식

열적비평형이 존재하는 방사, 흡수, 산란하는 회체 기체-입자 2상매질에 대한 복사전달방정식은 다음과 같으며, 기체분자에 의한 산란의 효과는 미약하므로 무시하였다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \frac{dI}{ds} + (\kappa_g + \kappa_p + \sigma_s)I &= \kappa_g I_{bg} + \kappa_p I_{bp} \\ &+ \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega' \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 복사열유속발산항

식 (5), (6)의 $\nabla \cdot \vec{q}^R$ 은 다음과 같이 식 (9)로부터 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dI}{ds} &= \hat{s} \cdot \nabla I \text{이므로,} \\ \nabla \cdot \vec{q}^R &= \int_{4\pi} (\hat{s} \cdot \nabla I) d\Omega \\ &= \int_{4\pi} \kappa_g I_{bg} d\Omega + \int_{4\pi} \kappa_p I_{bp} d\Omega - \int_{4\pi} (\kappa_p + \kappa_g \\ &+ \sigma_s) I d\Omega + \int_{4\pi} \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I(\hat{s}') \Phi(\hat{s}, \hat{s}') d\Omega' d\hat{s} \\ &= 4\pi \kappa_g I_{bg} + 4\pi \kappa_p I_{bp} - \kappa_g \int_{4\pi} I d\Omega - \kappa_p \int_{4\pi} I d\Omega \\ &= \kappa_g \left(4\pi I_{bg} - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \\ &+ \kappa_p \left(4\pi I_{bp} - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \\ &= \nabla \cdot \vec{q}_g^R + \nabla \cdot \vec{q}_p^R \end{aligned} \quad (10)$$

물리적으로 $\nabla \cdot \vec{q}^R$ 은 각 검사체적을 떠나는 단위 길이, 단위시간 당 순복사열에너지를 의미하며, 다

음의 형태를 가진다.

$$\nabla \cdot \vec{q}^R = \kappa \left(4\pi I_b - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (11)$$

따라서, $\nabla \cdot \vec{q}_g^R$ 기체에 대한 복사열유속발산항이라고 둘 수 있고, 하첨자 1은 g로 대체된다. 비슷하게, $\nabla \cdot \vec{q}_p^R$ 은 입자들에 대한 것이며, 하첨자 2는 p로 대체된다.

$$\nabla \cdot \vec{q}_g^R = \kappa_g \left(4\pi I_{bg} - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (12a)$$

$$\nabla \cdot \vec{q}_p^R = \kappa_p \left(4\pi I_{bp} - \int_{4\pi} I d\Omega \right) \quad (12b)$$

3.3 입자무리에 대한 복사물성치

일정한 크기의 입자들로만 구성된 입자무리 (particle cloud)에 대한 복사물성치는 아래와 같다.⁽⁸⁾

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \pi d_p^2 n_p Q_{sca}, \quad \kappa_p = \pi d_p^2 n_p Q_{abs}, \quad \beta_p = \sigma_s + \kappa_p \\ &= \pi d_p^2 n_p Q_{ext} \end{aligned} \quad (13a, b, c)$$

이 때, σ_s , κ_p , β_p 는 각각 산란계수, 입자흡수계수, 입자소멸계수를 나타내며, 입자를 난반사하는 구형으로 가정하였으므로, 다음의 관계식들이 성립한다.⁽⁸⁾

$$Q_{sca} = 1 - \epsilon_p, \quad Q_{ext} = 1, \quad Q_{abs} = \epsilon_p \quad (14a, b, c)$$

3.4 벽면온도의 처리

복사전달방정식의 경계조건인 벽면온도는 Thynell and Manchor가 제안한 벽면 경계에서의 에너지 평형을 이용하여 설정하였다.⁽³⁾

$$T_w = \left[T_p - \frac{q^R}{m_p c_p} \right], \quad ; x=0 \text{ or } x=L \quad (15)$$

4. 수치해법

우선 연속방정식과 상태방정식을 이용하여 모멘텀 방정식과 에너지 방정식을 변형한 뒤, 그 식들을 2차 또는 3차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 풀어 온도장을 구한다. 그리고, 얻어진 온도장을 바탕으로 복사전달방정식을 유한체적법으로 풀고 복사열유속발산항을 계산한다. 복사열유속발산항은 다시 에너지 방정식에 대입되어 온도장을 변화시키는 작용을 한다. 이런 일련의 과정들이 아래의 수렴조건을 만족할 때 까지 반복된다.

$$\left| \frac{\phi_j^{n+1} - \phi_j^n}{\phi_j^{n+1}} \right| < 10^{-8} \quad (16)$$

이 때 ϕ 는 T_g , T_p , u_g , 또는 u_p 이며, n 은 수렴 단계를 의미한다.

Pentium 100Mhz를 사용한 경우 수렴시간은 보통 5분 정도였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 프로그램의 검증

프로그램 검증을 위하여 복사가 없는 경우에 대해서는 Hrubby et al.의 연구와 비교하였다.⁽⁹⁾ 그들은 뜨거운 입자가 원통관 내의 상온의 공기를 통과하는 상황에 대한 실험과 수치계산을 함께 수행하였다. 입자속도, 입자온도, 기체온도에 대한 비교가 Fig. 2에 나타나 있다. 기체온도를 제외한 입자속도와 입자온도에 대해서는 본 계산이 Hrubby et al.의 계산보다 실험결과와 더 잘 일치한다. 기체온도의 경우에는 원통형 좌표계에 난류효과까지를 고려한 Hurby et al.의 경우에도 실험결과와는 많

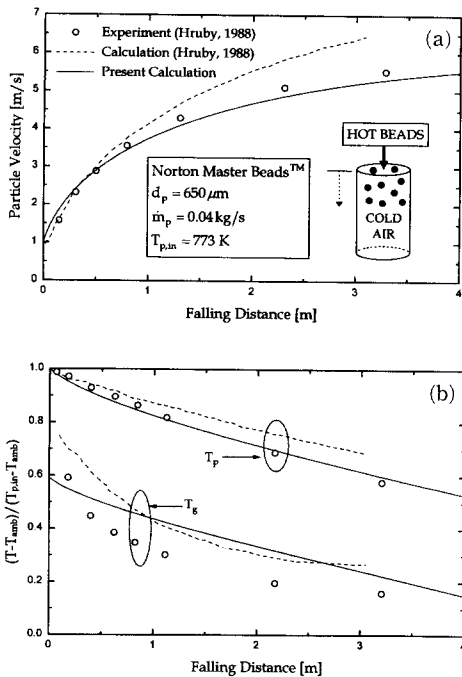


Fig. 2 Verification of the present program without radiation: (a) particle velocity; (b) nondimensionalized temperatures.

은 차이를 보이고 있다. 정량적으로 오차를 계산해보아도 입자 속도의 경우에는 5%, 입자 온도의 경우에는 4%를 넘지 못한다.

복사전달방정식을 대한 서브루틴은 이론해가 존재하는 간단한 경우와 비교하였다. 두 벽면의 온도가 각각 0K와 2000K이고, 벽면방사율은 1이며, 내부매질은 산란이 없이 광학두께가 10인 경우를 채택하였다. 수치계산과 이론해와의 비교가 Fig. 3에 나타나 있다.⁽⁸⁾ 수치해석에 사용된 격자계는 이며, 해석적인 결과와 매우 잘 일치하고 있다. 최대 오차도 2%보다 작다.

5.2 기체흡수계수의 영향

다른 특별한 언급이 없다면, 이하의 계산들은 모두 Table 3에 나타나 있는 작동조건들을 사용하였다. 위 벽의 방사율은 1로 두었으며, 아래 벽은 0.95로 두었다. 이는 아래 벽면을 제외한 공기열부와 입자가열부의 내부벽면이 완벽한 흑체에 이를 만큼 미연탄소(soot)로 덮여있다는 가정에 근거한다. 아래쪽 벽면은 고체입자들과의 충돌 때문에 완벽한 흑체가 아닐 수도 있다. 그리고, 고체입자의 표면방사율을 0.95라고 한 것은 고체입자들이 기체-입자 직접 접촉식 열교환기를 연속적으로 순환하는 동안 미연탄소가 입자표면에 달라 붙어 입자들이 거의 흑체에 가까운 성질을 가진다는 사실에 근거하고 있다.⁽³⁾ 질량유량비 (loading ratio)는 다른 기체-입자 직접 접촉식 열교환기에 관한 문헌들을 참고하여 1을 택하였다.^(2,3) 산란위상함수의 영향은 몇 가지를 검토한 결과 매우 미약하였으므로, 산란위상함수를 매개변수로 하는 연구는 하지 않았다.⁽¹⁰⁾ 사용된 산란위상함수는 난반사하는 구에 대해 유도된 것이며 다음과 같이, 산란각 ψ 의 함수로 나타난다.⁽¹¹⁾

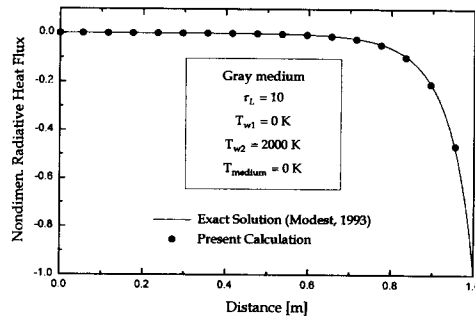


Fig. 3 Verification of the present program: subroutine solving RTE, $(N_x \times N_\theta) = (100 \times 12)$.

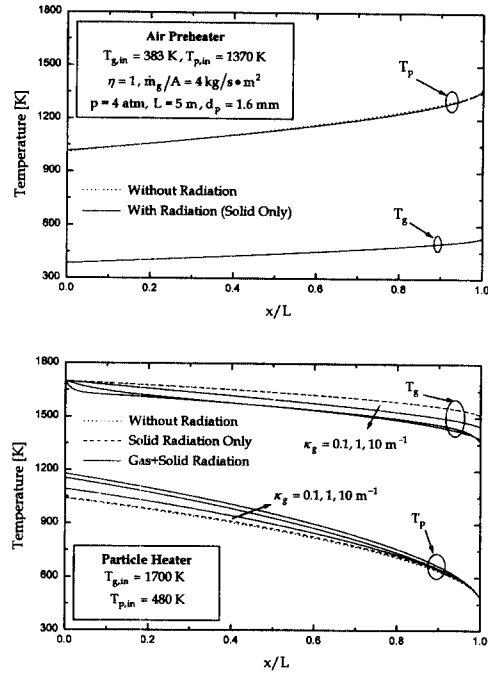
Table 3 Operating conditions of small scale air preheater and particle heater.

Conditions	Air Preheater	Particle Heater
Gas inlet temperature, $T_{g,in}$	383K	1700K
Particle inlet temperature, $T_{p,in}$	1370K	480K
Loading ratio, η	1	1
Gas mass flow rate per unit area, \dot{m}_g/A	4kg/s · m ²	4kg/s · m ²
Inlet chamber pressure, p	4atm	4atm
Chamber length, L	5m	5m
Solid particle used	Stainless steel	Stainless steel
Particle diameter, d_p	1.6mm	1.6mm
Top wall emissivity, $\epsilon_{w,top}$	1	1
Bottom wall emissivity, $\epsilon_{w,bottom}$	0.95	0.95
Particle emissivity, ϵ_p	0.95	0.95

$$\Phi(\Psi) = \frac{8}{3\pi} (\sin \Psi - \Psi \cos \Psi) \quad (24)$$

복사효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 각각에 대한 온도 분포가 Fig. 4에 나타나 있다. 공기예열부의 기체장은 복사에 투명하고 입자가열부의 기체장만이 복사에 관여하므로, 기체복사는 입자가열부 모사에서만 고려되었다. 기체복사의 영향을 기체흡수계수를 $\kappa_g = 0.1, 1, 10 \text{ m}^{-1}$ 로 변화시켜가면서 검토하였다. 일반적인 연소가스의 경우 $\kappa_g = 0.5 \text{ m}^{-1}$ 정도이나, 본 연구의 목적이 기체복사의 영향을 평가하는 것이므로 광학적으로 얇은 경우 ($\kappa_g = 0.1 \text{ m}^{-1}$)부터 두꺼운 경우 ($\kappa_g = 10 \text{ m}^{-1}$)까지 모두 살펴보았다.

본 연구에서 지배방정식들을 풀어서 얻어지는 입자흡수계수의 값은 거의 대부분의 영역에서 0.1 m^{-1} 보다 작고, 산란계수도 입자흡수계수의 1/20 정도이므로, 입자복사만 존재하는 매질에서의 복사효과와는 미약하다. 하지만, 기체복사가 함께 포함된다면, 전소멸계수가 2배에서 100배까지 증가하므로 복사에 의한 열전달량이 증가하여 온도장이 심하게 변화한다. 즉, 기체흡수계수의 범위가 0.1에서 10 m^{-1} 정도에서는 기체흡수계수가 증가함에 따라,

**Fig. 4** Temperature profiles for various gas absorption coefficients: air preheater and particle heater.

입자들의 온도는 증가하고 기체장의 온도는 떨어진다. 결론적으로 기체에 의한 복사를 무시하는 것은 복사효과와 심각한 과소평가를 야기할 수도 있음을 알 수 있다.

5.3 챔버길이의 영향

입자크기와 챔버입구압력이 일정한 경우 챔버길이 변화에 의한 온도장의 변화가 Fig. 5에 나타나 있다. 챔버길이는 공기 예열부와 입자 가열부 각각의 길이를 의미하며 본 연구에서는 동일하다. 챔버길이의 증가는 챔버 내에서 열전달이 일어나는 시간의 증가를 의미하므로, 챔버길이가 증가함에 따라, 기체와 입자간의 온도차가 명확하게 감소한다. 기체와 입자간의 열전도도의 차이 때문에 이런 효과는 기체장보다 입자에서 더 심하게 나타나며, 복사효과가 고려된 경우가 고려되지 않은 경우보다 더 명확하게 나타난다. Fig. 5, 6, 7에서는 입자복사에 의한 온도장의 변화가 아주 미약하기 때문에 입자 복사만이 고려된 온도분포는 나타내지 않았다. 그리고, 기체복사가 고려된 계산의 기체흡수계수는 모두 1 m^{-1} 의 값을 사용하였다.

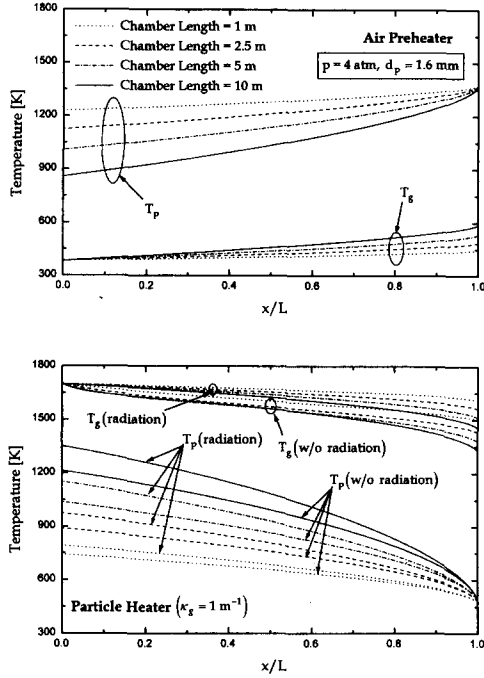


Fig. 5 Temperature profiles for various chamber length: air preheater and particle heater.

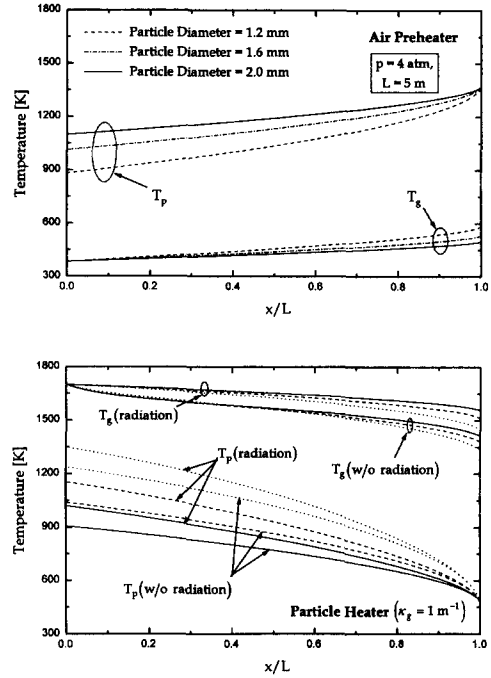


Fig. 6 Temperature profiles for various particle diameter: air preheater and particle heater.

5.4 입자크기의 영향

입자크기의 영향을 살펴보기 위해 세 가지의 입자크기, $d_p=1.2, 1.6, 2.0\text{mm}$ 를 Fig. 6에서 고려하였다. 질량유량비가 일정한 경우, 일정한 챔버길이와 챔버입구압력 조건에서 입자크기의 감소는 전열면의 확장에 의한 대류열유속의 증가 뿐만 아니라, 전 소멸계수의 감소에 따른 복사열유속의 감소를 동시에 가져온다. 하지만, 대류열유속의 크기가 복사열유속의 그것에 비해 공기에열부에서는 500배 정도이고, 입자가열부에서는 10배 정도이기 때문에 온도 변동은 대부분 대류에 의한 것이다.

5.5 챔버입구압력의 영향

Fig. 7에서 챔버길이가 입자크기가 일정한 경우 챔버입구압력의 영향을 관찰하였다. 챔버입구압력은 기체의 열용량(heat capacity)의 형태로 온도장에 영향을 끼치게 되어, 챔버입구압력의 증가에 따라 입자들의 온도가 공기에열부에서는 감소하고, 입자가열부에서는 증가한다.

5.6 크기 효과

열교환기의 규모는 보통 기체질량유량과 입자질량유량에 의해서 결정된다. 위의 계산들은 기체질

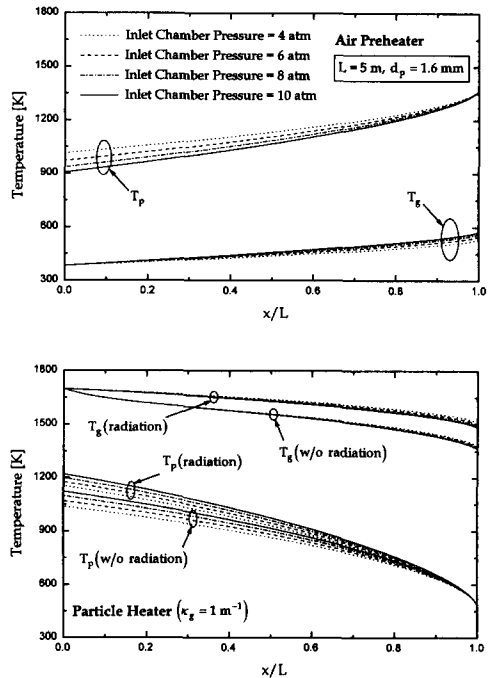


Fig. 7 Temperature profiles for various inlet chamber pressure: air preheater and particle heater.

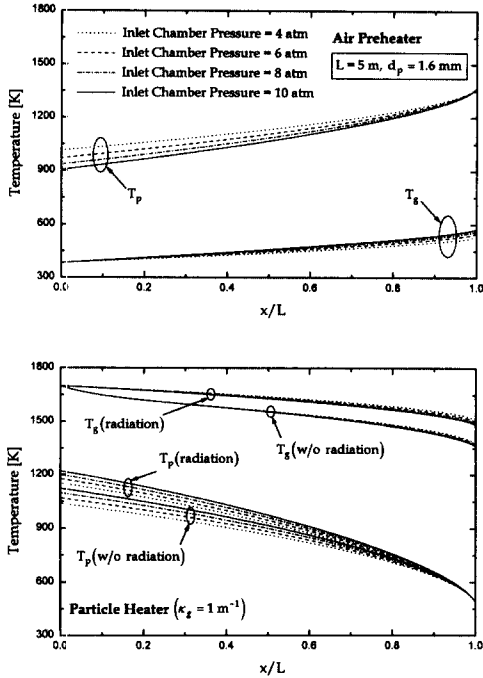


Fig. 8 Temperature profiles in large scale air preheater and particle heater.

량유속이 $\dot{m}_g/A=4\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 이고, 질량유량비가 $\eta=1$ 인 비교적 소형 열교환기에 대한 것이다. 하지만, 실제로는 이러한 소형 열교환기 뿐만 아니라 대형 열교환기가 필요한 경우도 있는데, Gat은 이러한 대형 기체-입자 직접 접촉방식의 열교환기에 대한 복사가 고려되지 않은 해석을 수행하였다.⁽³⁾ 그것은 기체질량유량이 $\dot{m}_g/A=53.43\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 공기 예열부와 기체질량유량이 $\dot{m}_b/A=43.95\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 인 입자가열부로 구성되어 있으며, 질량유량비는 1.91로 동일하다. 이 값들은 용량이 2500 ton/day 정도인 석탄가스화 설비에 대해 산출된 것이다. 다른 조건들은 변화 시키지 않은 채 위에서 언급한 질량유량 값들과 질량유량비를 사용하여 계산한 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 공기 예열부의 경우에는 기체복사가 존재하지 않기 때문에 복사를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 차이가 매우 적어 그림에서는 구별이 불가능한 정도이다. 질량유량이 비교적 적은 소형 열교환기에 대한 결과인 Fig. 4과 비교하면, 대형 열교환기의 입자 가열부의 온도 경향이 소형 열교환기의 입자 가열부의 온도 경향과 다른 점은 기체흡수계수의 증가에 따른 기체온도의 변화 경향이 서로 반대라는 점이다. 즉, 대형

열교환기의 입자가열부에서는 기체흡수계수의 증가에 따라 기체장의 온도와 입자들의 온도가 모두 증가하지만, 소형 입자가열부에서는 입자들의 온도는 증가하지만, 기체장의 온도는 감소한다.

이것은 기체복사와 입자복사가 모두 고려된 경우의 특성으로, 입자복사만이 고려된 경우에는 복사의 효과 자체가 미약하기 때문에 나타나지 않는다. 위에서 살펴본 차이점들을 이해하기 위해서는 복사 전달방정식의 경계조건을 살펴보아야 한다. 식 (15)에 의하면, 입자질량유량이 증가함에 따라 아래벽면의 온도는 그 점에서의 입자온도에 접근한다. 다시 말하면, 외부로의 복사열손실이 감소한다. 즉, 대형열교환기에서는 복사에 의한 열손실보다 복사에 의해서 벽면의 열이 전달되는 정도가 더 많이 때문에 매질의 온도가 증가하게 되지만, 소형 열교환기에서는 반대이기 때문에 매질의 온도가 감소한다.

6. 결 론

본 연구에서는 폐열 회수를 위한 기체-입자 직접 접촉방식의 열교환기에 수치모사를 수행하였다. 이전 연구에서는 무시하였던 기체복사효과를 고려하여, 다음의 결과들을 얻었다.

- (1) 입자들에 의한 복사효과 보다 기체장에 의한 복사가 상당히 크며, 기체복사를 무시하면 전체 복사 효과를 상당히 과소평가하게 된다.
- (2) 기체흡수계수가 증가함에 따라, 소형 열교환기에서는 기체장의 온도가 감소하고 대형 열교환기에서는 증가한다.
- (3) 복사를 고려한 경우, 챔버길이, 입자크기, 챔버입구압력의 변화에 따른 시스템 거동의 변동이 더 커진다.

참고문헌

- (1) Truelove, J. S. and Williams, R. G., 1988, "Coal Combustion Models for Flame Scaling," *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*, pp. 155-164, Seattle.
- (2) Gat, N., 1987, "The Circulating Balls Heat Exchanger (CIBEX)," *J. Thermophysics*, Vol. 1, No. 2, pp. 105-111.
- (3) Thynell, S. T. and Manchor, J. A., 1994,

- “Effect of Radiation on Stage Performance of the Falling Particle Heat Exchanger”, in Bayazitoglu, Y, Crosbie, A. L, Jones, P. D., Skocypec, R. D., Smith, T. F., Tong, T. W., Thynell, S. T. (ed.), *Radiative Heat Transfer: Current Research*, ASME HTD-Vol. 276, pp. 121~130.
- (4) 김만영, 백승욱, 1996, “유한체적법에 의한 복잡한 형상을 갖는 3차원 가스터빈 연소기내의 복사열전달 해석,” 대한기계학회논문집 (B), 제20권, 제8호, pp. 2681~2692.
- (5) Marble, F. E., 1970, “Dynamics of Dusty Gases,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 2, pp. 397~446, Annual Review Inc., Palo Alto.
- (6) Rudinger, G., 1980, *Fundamentals of Gas-Particle Flow*, Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam, pp. 40~52.
- (7) Adzerikho, K. S., Nogotov, E. F., and Trofinov, V. P., 1993, *Radiative Heat Transfer in Two-Phase Media*, CRC press, Boca Raton.
- (8) Modest, M. F., 1993, *Radiative Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (9) Hurby, J., Steeper, R., Evans, G., and Crowe, C., 1988, “An Experimental and Numerical Study of Flow and Convective Heat Transfer in a Freely Falling Curtain of Particles,” *ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 110, pp. 172~181.
- (10) Kim, T. K. and Lee, H. O., 1988, “Effect of Anisotropic scattering on Radiative Heat Transfer in Two-Dimensional Rectangular Enclosures,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 8, pp. 1711~1721.
- (11) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer (3rd ed.)*, Hemisphere Publishing Co., New York.