

〈논 문〉

유동층 연소로의 스케일-업을 위한 유동층 내 연료농도분포 해석

이 동 우* · 박 승 호**

(1996년 10월 8일 접수)

Analysis on the Fuel Concentration Distribution in a Fluidized Bed for the Scale-up of a FBC

D.W. Lee and S.H. Park

Key Words : Bubbling Fluidized Bed Combustor(기포 유동층 연소로), Fuel Concentration(연료 농도), Lateral Mixing(수평 방향 혼합), Scale-Up(스케일-업)

Abstract

A numerical investigation of the fuel concentration field in a fluidized bed has been carried out for the scale-up of a fluidized bed combustor (FBC). A two-dimensional transient model is developed using the two-phase fluidization, a simple chemical reaction, and lateral solid mixing theories. The uniformity of fuel concentration distributions is controlled by the location and the number of fuel feeders, fluidizing velocities and the bed-heights. While larger bubbles owing to greater fluidizing velocities enhance the fuel-dispersion in the bed, they have adverse effects on fuel combustion and thus result in the increase of fuel concentration, since a greater bubble means a larger bypass which reduces gas-exchange rates between bubble and emulsion phases. Average or maximum values of the bed fuel concentration are utilized as criteria for the scale-up from a pilot/lab-scale to a commercial-size bed.

기 호 설 명

<p>A : 층의면적, cm^2</p> <p>A_f : 유효 연료 공급 면적, cm^2</p> <p>C_{ae} : 에멀전상 내의 산소 농도, mol/cm^3</p> <p>C_{ab} : 기포상 내의 산소 농도, mol/cm^3</p> <p>C_{ao} : 초기 산소 농도, mol/cm^3</p> <p>C_f : 에멀전상 내의 탄소 농도, g/cm^3</p> <p>d_b : 기포 직경, cm</p> <p>d_f : 연료 직경, cm</p> <p>d_s : 층 구성 입자의 직경, cm</p>	<p>D_{ae} : 에멀전상 내에서 산소의 유효 확산 계수, cm^2/s</p> <p>D_{bed} : 층의 수력직경, cm</p> <p>D_{sh} : 연료의 유효 확산 계수, cm^2/s</p> <p>f_c : cloud-wake영역의 체적분율</p> <p>F : 연료의 공급률, g/s</p> <p>g : 중력 가속도, cm/s^2</p> <p>k_g : 고체-기체 경계에서 산소의 질량 전달 계수, cm/s</p> <p>K : 가스 교환 계수, $1/\text{s}$</p> <p>K_{bc} : 기포와 cloud-wake영역간의 가스 교환 계수, $1/\text{s}$</p> <p>K_{ce} : cloud-wake영역과 에멀전상간의 가스 교환 계수, $1/\text{s}$</p>
---	--

*홍익대학교 기계공학과 대학원

**회원, 홍익대학교 기계공학과

	환 계수, 1/s
L	: 총 높이
L_f	: 유동화시 총 높이
L_m	: 정지층의 높이
L_{mf}	: 최소 유동화시 총 높이
M_c	: 탄소의 분자량, g/mol
M_f	: 연료의 스케일-업인자
M_G	: 길이의 스케일-업인자
M_{Lm}	: 정지층 높이의 스케일-업인자
M_u	: 운전 속도의 스케일-업인자
N	: 연료 공급부의 수
r_a	: 연료의 반응률
R_f	: 연료의 반경, cm
Sh	: Sherwood수
t	: 시간, sec
T_{bed}	: 총 온도, K
u_b	: 기포 상승 속도, cm/s
u_{br}	: 단일 기포의 상승속도, cm/s
u_e	: 에멀전상 내의 공기 속도, cm/s
u_f	: 최소 유동화시 유동기체의 실제속도, cm/s
u_{mf}	: 최소 유동화 속도, cm/s
u_0	: 운전 속도, cm
W	: 층의 폭, cm
x_{fp}	: 층 벽면에서 연료 공급부 중앙까지의 거리, cm
x_{mid}	: 층 벽면에서 노 중심까지의 거리, cm
ϵ_b	: 기포상의 체적분률
ϵ_{mf}	: 에멀전상의 공극률
ϕ	: 당량비
μ	: 점도, g/cm ³ -s
ρ	: 밀도, g/cm ³
Ψ_f	: 연료 공급율 함수, g/cm ³ -s

하첨자

0	: 초기 상태
ab	: 기포상 내의 산소
ae	: 에멀전상 내의 산소
av	: 평균
b	: 기포
f	: 연료
g	: 가스
max	: 최대
p	: pilot scale

s : 층 구성 입자

1. 서 론

유동층 소각방식은 다른 소각방식에 비해 노 내의 온도가 비교적 균일하고, 연료와 공기가 잘 섞여 연소효율이 높고, 연속적인 연소에 대한 제어가 용이하다는 특징을 갖고 있다. 또한, 저온에서 연소가 가능하여 질소산화물의 배출이 근본적으로 적고, 황산화물의 노내 탈황이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 특성에 따라 고 유황 석탄 및 저발열량폐기물의 소각에 널리 이용되고 있다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 실험모형 유동층소각로의 스케일-업 과정에 대하여 논하고, 이때 중요한 연료의 연소과정 및 농도분포에 대하여 수치적으로 고찰하고자한다.

유동층 연소로 내의 연소는 일반적인 연소와 마찬가지로 확산 연소 및 예혼합 연소개념으로 설명될 수 있다. 각각의 연료입자관점에서는 확산연소이나, 투입된 연료가 유동층내에 균일하게 분포된다고 가정하면, 유동층 온도, 유동층 내 산소 및 연료의 연소성에 따라 연소 현상이 지배를 받는 예혼합 연소로 분류될 수 있다. 그런데, 다양한 입자 크기를 가진 연료를, 연소를 방해하지 않고 유동층내에 균일한 분포를 갖도록 투입하는 것은 매우 어려워 비현실적이다. 실제적으로도 고품 연료를 투입 장치를 통하여 유동층의 상부에 국부적으로 뿌리기 때문에 거시적 예혼합 연소로 보기는 어렵다. 그리고, 유동층의 유동이 활발하지 않다면, 층 내의 연료 농도가 불균일 해지고 공기와의 원활한 접촉이 되지 않으며 투입된 낮은 온도의 연료와 연료에 포함되어 있는 수분 때문에 국부적으로 온도가 낮아지게 되어 양호한 연소가 진행될 수 없다. 따라서, 노 내의 양호한 연소를 얻기 위하여는 연료가 층 내에서 균일하게 분포되고 연료, 유동상, 및 공기와의 혼합이 원활해지도록 유도하여야 한다.

연료의 유동층 내 혼합 특성에 대하여 여러 연구가 수행되었다. Fan 등^(2,3)은 1차원 모델을 통해 기포의 크기와 투입 연료량, 연료 투입구의 수 등의 운전 조건의 변화에 따른 연료 농도 분포의 변화를 통해 운전 조건이 연료의 농도 분포에 주는 영향을 보였다. Hirama 등⁽⁴⁾은 유동층 내 횡방향 혼합 계수가 기포 상승 속도와 기포 직경의 곱에

비례함을 보이고 기포 후류(wake)의 체적분율과 수력 직경을 이용한 횡방향 혼합 계수의 식을 제안하였으며, Qian 등⁽⁵⁾은 실험을 통해 연료의 혼합에는 기포의 영향 이외에 유동층 입자와 연료 입자의 직경과 밀도 차이에 따른 부력의 영향이 있음을 보였다. Salam 등⁽⁶⁾은 실험과 간단한 수치해석을 통해 유동층의 열확산 계수가 혼합 계수와 비례함을 보였다. 또한 Bellgardt 등⁽⁷⁾은 대형 AFBC (상압 유동층 연소로)에 대해 연료의 연소와 혼합을 고려한 수학적 모델을 정리하여 실험과 비교하였다.

이와 같이 유동층 연소와 연료의 혼합에 대하여 많은 연구가 진행되고 있지만, 유동층 내의 복잡한 수력학적 및 열 화학적 현상 때문에 제반 현상을 정확히 파악하여 이를 적절히 응용하여 연소로를 설계하기란 상당히 어렵다.^(8,9) 때문에 실제 상용화 규모의 소각로에서 일어나는 현상을 실험실규모 또는 파일럿 규모의 시스템에서 체계적으로 관찰할 수 있거나, 슬러깅(slugging)이 발생하지 않고, 동일한 유동화 특성을 갖도록 하는 스케일-업 기법이 요구된다. 기본적인 기법은 상사의 법칙으로, Glicksman,^(10,11) Horio 등^(12~14)이 1980년대 초반부터 독립적으로 연구를 진행하여 정리되고 있다. Glicksman은 입자에 대한 Reynolds 수를 기준으로 수력학적 현상의 상사성에 대한 관계식을 유도하고 이에 대한 실험적 고찰을 한바 있으며, Horio^(12,13) 등은 기포의 분열 및 합체에 대하여 상사 조건을 유도하였다. 이는 모두 유동층에서의 수력학적 움직임에 관점을 둔 것으로 이론 및 실험적으로 타당성이 증명이 되었다. 그러나, 이들은 연소를 배제한 냉간실험(cold-test)에 대한 상관조건이고, 연료/유동사의 혼합특성 및 연료의 투입 특성을 고려치 않은 이론이므로 실제 소각로의 설계에서 응용하기는 어렵다. 최근의 연구^(9,14)에서는 연료의 혼합을 고려한 스케일-업 이론이 발표되었지만 연소를 포함하고 있지 않아 이에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

본 연구에서는 유동층 소각로의 혼합 특성 및 연소 특성을 포함하여 지배방정식을 유도하고, 그리고 이를 수치해석하여서, 유동층내의 연료농도분포를 얻어 스케일-업에 적용하였다. 유동층 내의 연료와 유동사 간의 혼합은 일반적으로 3차원 현상이지만, 본 연구는 유동층 내에서 수직 방향으로의 농도 차이는 없다고 가정하여^(2,3,7) 2차원으로 수행하였다. 이런 유동층에 대한 모델을 이용하여 유동

층에 연료가 투입되어 연소 되는 과정을 동적으로 해석하여 여러 가지 운전 조건에 대한 연료의 농도 분포의 변화를 구하고, 이를 확장하여 유동층의 스케일-업에 응용하였다.

2. 해석

Fig. 1에 나타난 유동층의 개략도에서 같이 x축은 유동층의 너비 방향이 되고 y축은 폭 방향, z축은 높이 방향이 된다. 그러나, 본 연구에서는 유동층의 단면의 길이가 W인 정방형이라 가정하였다. 유동층 상부로 연료가 공급되고, 유동층의 하부 바닥면에서는 유동화 및 연소용 공기가 속도 u_0 로 균일하게 공급된다.

이와 같은 기포형 유동층 소각로를 수학적으로 모델링하기 위해서 아래의 사항들을 가정하였다.

1) 유동층 내부의 유동은 기포상(bubble phase)과 에멀전상(emulsion phase)의 2상으로 구성된다고 가정한다.⁽¹⁵⁾ 이 가정과 더불어 연소가 일어나는 부분은 에멀전상 한 부분으로 국한시키고 기포상에서는 연소가 없이 에멀전상과의 물질 전달만을 고려한다.

2) 유동층을 이루는 입자는 Geldart group B 입자만을 고려하였다. 이는 보통 유동층 소각로에서 쓰이는 입자들의 직경이 0.5~1.0 mm 정도 되고 밀도가 약 2.54 g/cm³ 정도 되는 모래로 이루어지기 때문이다.^(8,9) 연소가 진행되어 감에 따라 연소 잔유물과 섞여 유동층의 평균 입자 크기나 평균 밀도가 변할 수 있으나 이는 해석의 단순화를 위해 고려하지 않았다.

3) 유동층 내의 혼합은 높이 방향으로 잘 섞인다고 가정한다. 이것은 z방향으로의 확산 계수가 x

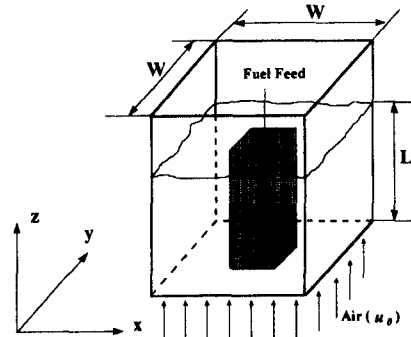


Fig. 1 Schematic diagram of a fluidized bed

방향의 확산 계수에 비해 차수 (order of magnitude)가 1 이상 크기 때문이며, 따라서 일단 연료가 투입된 후 유효 공급 면적에 높이 방향으로 전체적으로 일정한 농도로 분포된다고 볼 수 있다. 즉 z방향으로의 농도 구배는 무시할만하다고 가정한다. (2,3,7,15)

4) 발생된 기포는 높이에 관계 없이 크기는 일정하다고 가정한다. 이 가정은 x, y방향 2차원 해석에 필요한 가정이다. (2,3) 물론 기포의 크기는 높이에 따라 달라지지만 평균 기포 크기를 구하고 이를 유동층의 특성 기포 크기로 가정한다.

5) 연료는 석탄이라 가정하고 연소 과정은 $C+O_2 \rightarrow CO_2$ 로 단순화한다.

6) 연료 입자의 연소는 산소의 막 확산에 의해 조절된다.

7) 유동층은 온도가 일정하다고 가정한다. 즉, 연소 과정이 등온 과정으로 진행되고, 층 내부 온도도 균일하게 유지된다고 가정한다. (2,3,5)

8) 확산 계수는 x, y방향에 대해서 등방성이라고 가정한다.

9) 연료의 비말 동반 유동을 고려하지 않는다. 본 연구의 초점은 유동층 내부에의 연소 현상에 국한하였기 때문이다. 그러나 이는 향후 연구에서 수행되어야 할 대상이다.

2.1 지배방정식

유동층 내 고체연료의 연소는 일반적인 고체 연소와 마찬가지로 연료 입자가 층 내로 투입되고, 입자의 가열이 일어난 후 가열된 입자에서 수분이 먼저 증발하고, 열분해가 일어나 휘발분과 고정 탄소를 분리된다. 이 휘발분은 기포상 내, 혹은 유동층 상부의 자유단(freeboard)에서 연소되며, 에멀전상 내에서는 고정 탄소의 연소가 진행된다. (16-18) 이런 복잡한 연소 현상을 unreacted core model을 적용하여 단순화하면, 고체 연료에 대한 반응률은 다음과 같다. (2,3)

$$R_a = 6 \frac{k_g}{\rho_f d_f} C_f C_{ae} \quad (1)$$

유동층 내에서의 제반현상을 해석하기 위하여 아래와 같은 지배방정식을 사용하였다. 기포상 내의 산소에 대한 보존방정식은

$$\frac{\partial C_{ab}}{\partial t} = -u_b \frac{\partial C_{ab}}{\partial z} - K(C_{ab} - C_{ae}) \quad (2)$$

이고, 여기서 기포상의 유동을 plug flow로 가정하였기 때문에 x-y평면에서의 거동은 무시하였지만, 기포상 내의 산소농도 C_{ab} 는 t와 z의 함수일 뿐 아니라, x와 y의 함수이기도 하다. 에멀전상 내의 산소에 대한 지배 방정식은

$$\begin{aligned} \epsilon_{mf} \frac{\partial C_{ae}}{\partial t} = & \frac{u_{mf}}{L} (C_{a0} - C_{ae}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ae} \frac{\partial C_{ae}}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{ae} \frac{\partial C_{ae}}{\partial y} \right) + \frac{\epsilon_b}{1 - \epsilon_b} \frac{1}{L} \int_0^L K (C_{ab} \\ & - C_{ae}) dz - \frac{6k_g}{\rho_f d_f} C_f C_{ae} \end{aligned} \quad (3)$$

이며, 에멀전상 내의 연료에 대한 지배방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{sf} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{sf} \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\Psi_f}{1 - \epsilon_b} \\ & - \frac{6k_g}{\rho_f d_f} C_f C_{ae} M_c \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 이에 대한 초기조건과 경계조건은

$$t=0 : C_{ab} = C_{ae} = C_{a0}$$

$$t>0 : C_{ab} = C_{a0} \quad \text{at } z=0$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial x} = \frac{\partial C_{ae}}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0, W$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial y} = \frac{\partial C_{ae}}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=0, W \quad (5)$$

이며, 연료의 공급량 F에 대한 투입 함수 Ψ_f 는 다음과 같다.

$$\Psi_f = \frac{F}{N \cdot A_f \cdot L} \quad (\text{연료투입면내부})$$

$$\Psi_f = 0 \quad (\text{연료투입면외부}) \quad (6)$$

파일럿 규모의 연소로에서는 유동층의 벽면에 연료가 투입된다고 가정하였고, 스케일-업 된 연소로에서는 층의 중심에 투입된다 가정하였다.

2.2 확산계수 및 가스교환계수

유동층 내에서 연료의 확산은 여러 가지 기구에 의해 이루어지나 일반적으로 중요한 현상은 다음과 같다. 첫 번째는 기포의 상승시 수반되는 거시적인 고체 입자의 순환이고, 두 번째는 기포의 후류에서의 난류 운동의 영향에 의한 혼합이고, (15) 세 번째는 기포가 유동층의 상부에서 터질때 자유 유동 영역으로 분사되는 유동매체와 함께 분산되는 현상이다. 확산 계수에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나 (5,6,14) 완벽한 이론이 정립되어 있지 않고 각각의

Table 1 Relationships among variables⁽¹⁵⁾

Minimum fluidization velocity (mf) [cm/sec]	$\frac{d_s u_{mf} \rho_g}{\mu_g} = \left[(28.7)^2 + 0.0494 \left(\frac{d_s^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g} \right) \right]^{1/2} - 28.7$
Bed heights [cm]	$\begin{aligned} [L_m(1-\epsilon_m)]_{fixed\ bed} &= [L_{mf}(1-\epsilon_{mf})]_{mf} \\ &= [L_f(1-\epsilon_f)]_{bubbling\ bed} \\ \epsilon_e &\cong \epsilon_{mf} \\ \epsilon_f &= \epsilon_b + (1-\epsilon_b)\epsilon_e \end{aligned}$ for Geldart B, D
Bubble fraction in the bed	$\epsilon_b = \frac{u_0 - u_{mf}}{u_b} \quad 2.5u_e < u_b < 5u_e$
Velocity of a bubble rising through the bed	$u_b = u_0 - u_{mf} + u_{br} = u_0 - u_{mf} + 0.711(gd_b)^{0.5}$
Bubble diameters [cm]	$\begin{aligned} d_{b0} &= \frac{2.78}{g} (u_0 - u_{mf}) & z=0 \\ d_{bmax} &= 0.65 \left[\frac{\pi}{4} D_{bed}^2 (u_0 - u_{mf}) \right]^{0.4} & z \rightarrow \infty \\ d_b &= d_{bmax} - \frac{(d_{bmax} - d_{b0})}{\exp(0.3z/D_{bed})} & z=z \end{aligned}$
Volume fractions of cloud per bubble volume	$f_c = \frac{3u_f}{u_{br} - u_f} = \frac{3u_{mf}/\epsilon_{mf}}{u_{br} - u_{mf}/\epsilon_{mf}}$

경우에 따른 실험식들이 나와 있을 뿐이어서 더 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Kunii와 Levenspiel⁽¹⁵⁾이 제안한 다음의 식을 사용하였으며, 에멀전상내의 산소에 대한 확산계수도 이와 같다 가정하였다. 이 경우 세 번째의 현상에 의한 확산은 포함되지 않는다.

$$D_{sh} = D_{ae} = 0.187 \epsilon_b u_{mf} \frac{d_b}{(1-\epsilon_b)\epsilon_{mf}} \quad (7)$$

기포상과 에멀전상 사이의 물질 교환 계수⁽¹⁵⁾는 기포와 기포 주위의 cloud 간의 교환 계수(K_{bc})와 cloud와 에멀전상과의 교환 계수(K_{ce})의 조합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{bc}} + \frac{1}{K_{ce}} \quad (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} K_{bc} &= 4.5 \frac{u_{mf}}{d_b} + 5.85 \left(\frac{D^{0.5} g^{0.25}}{d_b^2} \right) \\ K_{ce} &= 6.77 \left(\frac{D \epsilon_{mf} u_{br}}{d_b^3} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 빠른 기포 ($u_{br}/u_f < 100$)의 경우 cloud의 두께가 매우 얇아 연소가 에멀전상에서만 일어난다고

가정하여도 무난하지만, 이번 연구에서의 운전 범위는 비교적 느린 기포 속도 범위 ($1 < u_{br}/u_f < 7$)에 들어 cloud영역이 기포상을 제외한 상당 부분을 차지한다. 따라서 cloud영역에서의 연소를 고려하기 위하여 다음과 같은 새로운 물질 교환 계수를 정의하였다.

$$K' = (1 - \epsilon_b f_c) K + \epsilon_b f_c K_{bc} \quad (10)$$

여기서 f_c 는 기포에 대한 cloud의 체적분율이다. 본 연구에 사용된 몇 가지의 일반적인 계수들의 관계를 Table 1에, 변수들을 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Physical parameters used in this study

C_{a0}	$2.279610^{-6} \text{ mol/cm}^3$
d_f	0.3cm
d_s	0.08cm
D	$1.74 \text{ cm}^2/\text{sec}^{(2,3)}$
K_g	$Sh D/d_f$
T_{bed}	800 °C
ρ_f	1.3 g/cm^3
ρ_s	2.5408 g/cm^3

Table 3 Magnification variables⁽⁹⁾

Design parameters	Scale-up factors
Fuel input rates	$M_f = \frac{m_f}{m_{f,p}} = \frac{\rho_g u_0 A}{(\rho_g u_0 A)_p}$
Bed areas	$M_c^2 = \frac{A}{A_p}$ $= \left[\frac{(M_f u_{0,p} - u_{mf} M_c^2)}{(u_0 - u_{mf})_p} \right]^{0.8}$
Operating velocities	$M_u = \frac{u_0}{u_{0,p}}$
Bed heights	$M_{Lm} = \frac{L_m}{L_{m,p}} = \frac{M_u M_c^2}{D_{sh}/D_{sh,p}}$

3. 스케일-업 이론

스케일-업이란 작은 실험실 규모, 혹은 소규모 설비의 설계 조건 및 운전 정보를 이용하여 적당한 상사를 통해 대형화 설비의 설계 조건을 구하는 기법이다. 이런 스케일-업 기법은 적은 양의 운전 경험과 정보만으로도 적용이 가능하다는 것이 가장 큰 장점이라고 할 수 있다.

Horio의 스케일-업 이론^(12,13)은 유동층 내에서 유동사의 움직임이 기포의 거동에 크게 지배 받기에 기포의 분열 및 합체에 대한 상사를 기준으로 한다. 기포의 형태, 크기, 발생 빈도, 압력의 변화 등을 실험적으로 측정함으로써 이 이론의 타당함이 증명되었고 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$u_0 - u_{mf} = \sqrt{M_c} (u_0 - u_{mf})_p \quad (11)$$

$$u_{mf} = \sqrt{M_c} u_{mf,p} \quad (12)$$

여기서 하첨자 p는 파일럿 규모를 의미한다.

앞에서 언급한 바와 같이 일반적인 유동층 소각로에서의 유동사는 Geldart group B에 속하므로 본 연구에서는 Horio의 법칙 중 기포들의 합체에 대한 상사 법칙 식 (11)를 선택하여 유동화 공기 속도 및 소각로 직경의 스케일-업에 적용하였다. Table 3에 Horio의 상사 조건을 기본으로 연료의 확산만을 고려한 스케일-업 인자⁽⁹⁾에 대하여 정리하였다.

4. 결과 및 토의

유동층 연소로에서의 연료농도분포를 구하기 위

하여 지배 방정식을 경계 조건과 함께 수치적으로 해석하였다. 기포상에 대한 지배 방정식인 식 (2)는 explicit 법을 사용하였고, 이때 Courant 수($u_0 \Delta t / \Delta x$)를 0.7로 하여 안정된 수렴을 유도하였다. 그 외의 emulsion 상 내의 공기 및 연료에 대한 지배 방정식은 Crank-Nicolson법으로 차분화하였다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서 스케일-업대상의 예로써 선정된 파일럿 규모의 연소로의 기하학적 규모는 노 단면적 $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$, 정지층 높이 0.4 m이고 연료는 벽면에서 투입된다고 가정하였다. 이 파일럿 플랜트로부터 단면적 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 의 실규모급 연소로로 스케일-업하기 위하여 결정하여야 하는 변수는 운전 속도와 유동층의 높이이다. 운전속도는 식 (11)으로부터 구할 수 있고 층의 높이는 수치계산결과 노 내 평균 농도 또는 최대 농도를 기준으로 구할 수 있다. 즉, 파일럿 플랜트와 동일한 평균 농도, 또는 동일한 최대 농도가 되는 경우의 층의 높이가 실규모급의 유동층의 높이가 된다.

먼저 스케일-업 하기 전에 실규모급 연소로 내에서의 제반 현상을 관찰하면 다음과 같다. Fig. 2는 유동화 속도에 따른 횡 방향 혼합 계수와 가스 교환 계수의 변화를 나타내고 있다. 횡 방향 혼합 계수는 최소 유동화 속도에 비례하나, 가스교환계수는 유동화속도의 증가에 따라 감소하는 현상을 보인다. 유동화 속도가 증가할수록 유동층 내의 기포 크기가 커지기 때문에 혼합계수가 증가하게 된다. 그러므로 균일한 농도 분포를 얻기 위해서 횡 방향 혼합 계수를 높으려 한다면, 유속을 빠르게 하여 기포의 크기가 커지게 하는 것이 가장 빠르고 확실한 방법이다. 그러나, 유속의 증가는 가스 교환 계수의 감소를 동반하므로 유입 공기 중에 포함된 산

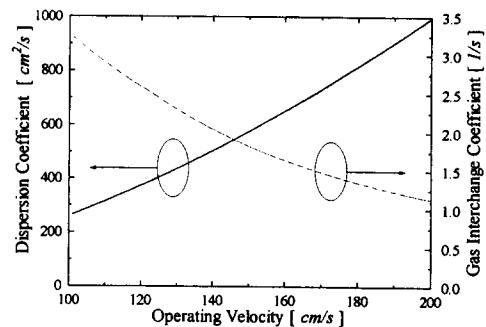


Fig. 2 Horizontal dispersion and gas interchange coefficients for various operating velocities

소 중 연소에 참여하지 못하고 그대로 자유단 (freeboard) 영역으로 방출되는 양이 늘어나 층에서의 연소율의 저하를 유발한다. 이는 유속의 증가로 기포 주위의 cloud 영역의 크기가 줄어들게 되어 상대적으로 가스의 교환이 어려운 단순 에멀전 영역이 늘어나기 때문이다. 따라서 단순히 운전 속도의 증가만으로 균일한 농도 분포를 얻는다는 것은 연료의 연소 측면에서 그다지 바람직하지 않다는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 3에서는 유동화 속도에 따른 유동층내 평균 연료 농도와 최대 연료 농도의 변화를 나타내었다. 이 경우 일정한 당량비 ϕ (equivalence ratio)에 대한 해석을 수행하기 위하여 유속의 증가에 따라 연료투입량이 비례하여 증가토록 설정하였다. Fig. 2에서 설명한 바와 같이 유속이 증가함에 따라 가스 교환 계수의 감소에 따라 연소율이 저하되어 노내 연료 농도가 급격하게 증가하는 현상을 보인다. 하지만 유속이 증가함에 따라 수평 방향 확산 계수가 증가하므로 최대 연료 농도와 평균 연료 농도와의

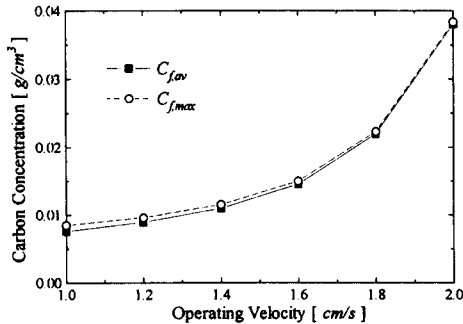


Fig. 3 Effects of operating velocity on the average and maximum carbon concentration in the bed

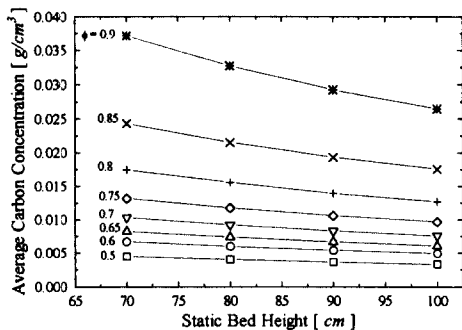


Fig. 4 Effects of equivalence ratios and static bed heights on the average carbon concentration

차이는 점점 줄어든다.

유동화 공기에 의하여 층이 팽창하기 전의 상태인 정지층의 높이와 당량비(ϕ)가 평균 연료 농도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 당량비가 증가하여 1.0으로 접근할수록 평균 농도는 급격하게 증가하며, 정상상태로의 수렴 시간도 급격하게 증가하였다. 정지층 높이가 높아질수록 평균 연료 농도는 낮아지는 경향을 보였으나, 층 높이의 선형적인 증가에 비하여 평균 연료 농도는 감소율이 낮았다. 이는 층 높이가 높아질수록 평균 기포 직경이 커지기 때문에, 이에 따라 감소되는 가스 교환 계수의 영향이라고 판단된다.

유동층에서의 연료 농도 분포는 투입부의 위치에 따라서도 달라진다. 벽면에서 노 중심까지의 거리를 x_{mid} 라고 하고 벽면에서 실제 투입부까지의 거리를 x_{fp} 라고 하면, 이 두 값의 비로써 투입부의 위치를 나타낼 수 있다. Fig. 5에서는 투입구 위치 ($x_{fp}/x_{mid}=0, 0.5, 1$)에 따른 유동층 내 농도 분포를 보여준다. 각 경우를 비교하여 보면 벽면투입 ($x_{fp}/x_{mid}=0$)의 경우 농도 분포 중 최대치와 최소치의 차이는 중앙의 절반 지점 ($x_{fp}/x_{mid}=0.5$)과 중심 부근 ($x_{fp}/x_{mid}=1$) 투입의 경우보다 매우 크게 나타난다. 즉 연료 투입부가 벽면에서 중앙 쪽으로 갈수록 농도 분포의 최대치와 최소치의 차이가 줄어드는 경향을 보였다. 이런 현상은 이번 연구에서는 수분의 증발이나 휘발분의 증발을 고려하지 않았고 등은 과정으로 가정하였기 때문에 크게 문제가 없었지만, 만약 이를 고려한다면 연료의 편중으로 인한 국부적인 온도의 하강이나 이에 의한 연소율의 저하를 예상할 수 있다. 이는 스케일-업시에 작은 규모의 파일럿 플랜트에서는 문제가 심각하게 나타나지 않더라도 큰 규모의 상용화 설비로의 확장 시에는 고려해야 할 현상임을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 연료 공급부를 벽면 ($x_{fp}=0$ cm)에서 중심 ($x_{fp}=100$ cm)까지 이동 시키면서 평균 연료 농도 분포와 농도의 최대치의 변화를 보여준다. 연료 투입부가 이동하면서 평균 연료 농도는 크게 변하지 않았으나 중심으로 접근함에 따라 미량의 감소를 보였다. 하지만 최고 연료 농도는 투입부의 위치가 중심으로 접근함에 따라 상당히 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 특히 이런 농도 차이는 설비의 규모가 커질수록 커지는 경향을 보였다. 이 결과는 설비의 규모가 클 경우 연료 투입구의 위치가 균일한 층 내 연료 분포에 큰 영향을 준다는 것

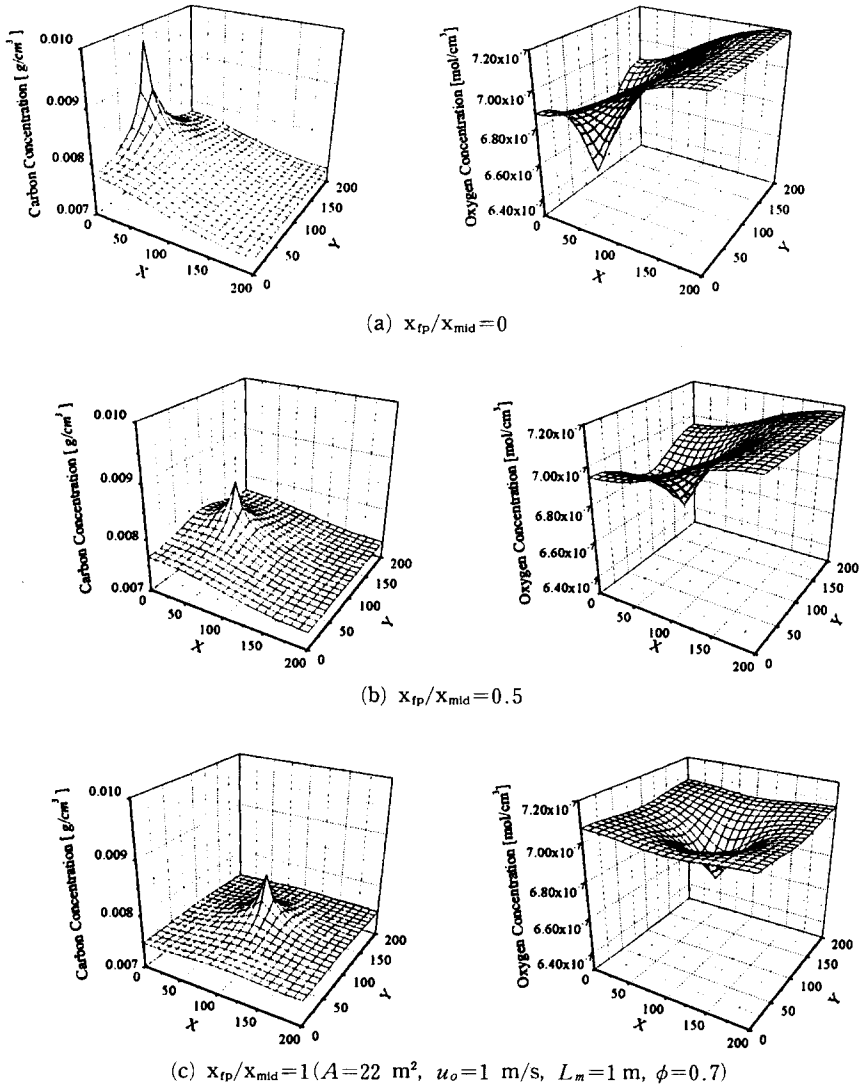


Fig. 5 Effects of the feeder position on the carbon concentration profiles

을 의미한다.

위에서 언급한 바와 같이 균일한 농도 분포를 유지하기 위해서 중심에서 투입할 수 있으나 좀더 적극적인 대책으로써 연료 공급부의 수를 늘리는 경우도 고려할 수 있다. 연료 공급부의 수를 중심 축 ($y=100\text{cm}$)을 따라 2, 3개로 늘렸을 때의 연료 농도 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 연료 공급부의 수가 증가함에 따라 평균 농도의 경우 거의 차이가 없었으나 연료 농도 분포의 최대치와 최소치 사이의 차이가 줄어들고 전체적으로 균일한 농도 분포를 이루었다.

전술한 유동층에서의 제반 현상을 이해한 후, 이를 연소로의 스케일-업에 이용할 수 있다. 스케일-업된 유동층의 넓이 및 유동과 속도는 식 (11)을 이용하여 정리하면 Table 3에서의 M_c 와 M_u 로 표현된다. 이는 기본적으로 유동 현상의 수력학적 상사를 기본으로 하고 있기 때문에 층의 높이를 결정하고 투입구의 위치를 선정할 때 필요한 자료를 제공할 수 없다. 이를 위하여는 연료의 혼합과 연소 현상을 고려한 스케일-업 기법이 필요하다. 연료와 유동 매체의 혼합 특성만을 이용하여 유동층의 높이에 대한 스케일-업 인자를 유도하면 Table

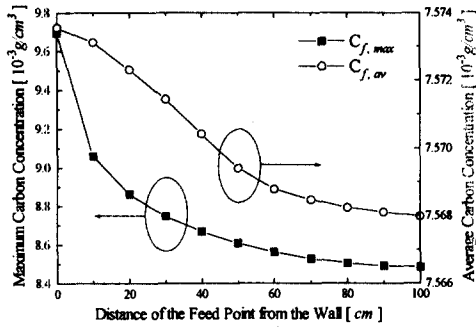


Fig. 6 Average carbon concentration and maximum carbon concentration for the distances of the feed point from the wall

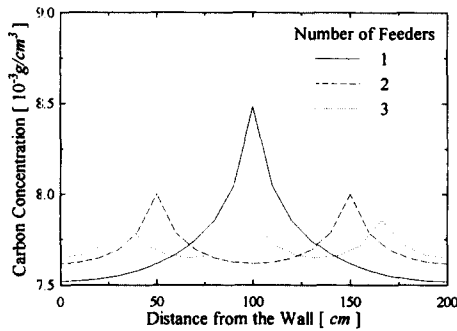


Fig. 7 Effects of the number of feeders on the carbon concentration profiles

3에서의 M_{Lm} 과 같이 정리된다.

Fig. 8에서 연료의 평균 농도와 최대 농도를 기준으로 스케일-업 인자들의 변화를 계산한 결과를 혼합만을 고려한 기존의 이론, 즉 Table 3에서의 M_{Lm} 을 이용한 결과와 비교하였다. 일반적으로 노의 단면적이 증가함에 따라 층의 높이가 증가하는 경향을 나타내나, 연료의 혼합만을 고려한 경우가 본 연구에서 계산한 결과보다 증가율이 높음을 보인다. 연료와 유동 매체와의 혼합만을 고려한 모델에서는 연료의 확산 특성 길이에 크게 의존하나, 본 연구에서는 평균 농도 또는 최대 농도를 기준으로 한 연소특성 때문에 증가율에 있어서의 차이를 보인다. 연료의 최대 농도를 기준으로 할 경우가 평균 농도 기준의 경우보다 증가율이 약간 높음을 보이나, 비교적 큰 차이가 없다고 볼 수 있다. 이는 연료의 확산율과 연소율이 비슷하기 때문이다.

파일럿 플랜트의 운전 속도에 따라 스케일-업된

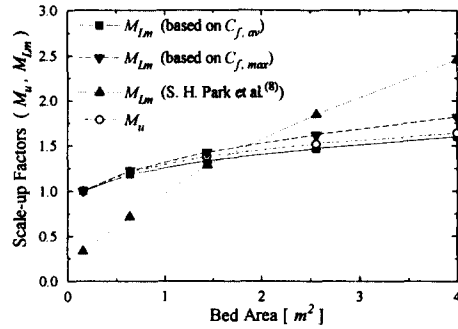


Fig. 8 Comparison of scaled-up static bed height based on average carbon concentration, maximum carbon concentration, and the simple mixing theory ($\phi=0.7$)

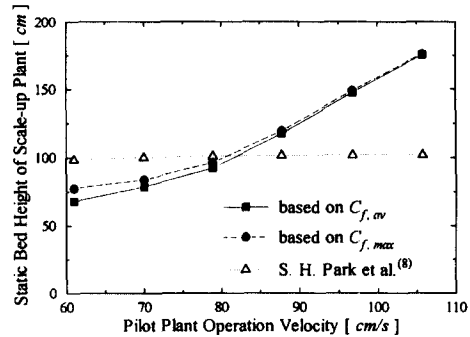


Fig. 9 Comparison of scale-up factors based on average carbon concentration, maximum carbon concentration, and the simple mixing theory⁽⁸⁾

플랜트의 정지층 높이를 Fig. 9에 비교하였다. 연료의 혼합만을 고려한 경우에는 스케일-업된 정지층의 높이가 거의 변화하지 않았으나, 본 연구의 결과는 정지층의 높이가 유동화 속도에 따라 상당히 증가함을 보인다. 유동화 속도 및 층의 높이가 증가함에 따라 기포의 직경이 증가하고, 이에 따라 가스 교환 계수가 감소하여 원활한 연소가 일어나지 않으므로, 파일럿 플랜트와 같은 평균 또는 최대 연료 농도를 갖기 위해서는 더 높은 정지층 높이가 필요하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 간단한 연소 모델을 이용하여 유동층 소각로의 노 내의 농도 분포를 수치적으로 해석하고, 이를 파일럿 규모의 연소로부터 실규모 연소로로의 스케일-업에 적용하였다.

연구 결과로부터 연료의 농도 분포는 여러 가지 인자들에 의해 변화될 수 있음을 보였다. 유동화 속도가 증가함에 따라 연료의 확산은 증가하였으나 기포직경의 증가에 따른 가스교환계수의 감소로 연소율의 저하를 확인하였다. 연료의 평균농도는 유동화속도, 당량비, 및 유동층의 높이에 의존하였고, 최대농도는 연료의 투입위치 및 투입구의 개수에 따라 크게 변화하였다. 그리고 연료의 최대농도와 평균농도의 차이는 연료의 연소특성보다 연료의 확산특성에 더 영향을 받았다.

유동층 내 연료농도를 기준으로 스케일-업을 수행한 결과는 연소 현상의 고려에 의한 영향으로 혼합만을 고려한 이전의 연구들과는 약간의 차이를 보였다. 우선 노 단면적이 커질수록 기존의 스케일-업이론보다 더 낮은 정지층 높이를 얻을 수 있었다. 파일럿 플랜트의 운전 속도 변화에 따른 스케일-업에서는 기존의 연구 결과와는 달리 속도가 증가함에 따라 층높이가 증가하는 결과를 보였는데, 이는 유속의 증가에 따른 가스 교환의 감소 때문이었다. 즉 운전 속도의 증가는 연료 혼합에는 긍정적으로 작용하지만 연소의 측면에서 좋지 않은 결과를 가져올 수 있다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술 연구 조성비(기제공학: ME95-A-10)에 의하여 수행되었으며 교육부의 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) 日本化工學會, 1992, 流動層, 化學工學의 進歩 26, 槓書店.
- (2) Fan, L. T., Tojo, K. and Chang, C. C., 1979, "Modeling of Shallow Fluidized Bed Combustion of Coal Particles," *Ind. Eng. Chem. Process Des.*, Vol. 18, No. 2, pp. 333~337.
- (3) Tojo, K., Chang, C. C. and Fan, L. T., 1981, "Modeling of Dynamic and Steady-State Shallow Fluidized Bed Coal Combustors. Effects of Feeder Distribution," *Ind. Eng. Chem. Process Des.*, Vol. 20, No. 3, pp. 411~416.
- (4) HIRAMA, T., ISHIDA, M. and SHIRAI, T., 1975, "The Lateral Dispersion of Solid Particles in Fluidized Beds," *日本 化學工學論文集*, 第 1 卷, 第 3 號, pp. 272~276.
- (5) Qian, X., Guoguan, H, Mingjiang, N. and Kefa, C., 1988, "Lateral Dispersion of Large Particles in an Industrial-Scale Fluidized Bed Combustors," *The 9th Int. Symposium of FBC*, pp. 546~553.
- (6) Salam, T. F., Ren, Y. and Gibbes, B. M., 1988, "Lateral Solid and Thermal Dispersion in Fluidized Bed Combustors," *The 9th Int. Symposium of FBC*, pp. 541~545.
- (7) Bellgardt, D., Hembach, F., Schoessler, M. and Werther, J., 1987, "Modeling of Large Scale Atmospheric Fluidized Bed Combustors," *The 9th Int. Conf. of FBC*, pp. 713~722.
- (8) 김종억 외, 1994, "산업 폐기물 유동층 소각 방식 소각 장치 개발," 상공자원부.
- (9) 박승호, 김종억, 박범성, 1996, "저 발열량 폐기물 소각용 유동층 소각로의 Scale-up에 관한 연구," 한국 연소 학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 1~10.
- (10) Glicksman, L. R., 1984, "Scaling Relationships for Fluidized Beds," *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 9, pp. 1373~1379.
- (11) Nicastro, M. T. and Glicksman, L. R., 1984, "Experimental Verification of Scaling Relationships for Fluidized Beds," *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 9, pp. 1381~1391.
- (12) Horio, M., Nonaka, A., Sawa, Y. and Muchi, I., 1986, "A New Similarity Rule for Fluidized Bed Scale-up," *AIChE Journal*, Vol. 32, No. 9, pp. 1466~1482.
- (13) Horio, M., 1987, "Scaling Law of Bubbling Fluidized Beds," *Fluidization 87: Proceedings of the First Korean-Japan Symposium on Fluidization*, pp. 239~248.
- (14) Horio, M. and Ishida, M., 1988, "Scale-Up Fluidized Beds and the Similarity Rule for Solid Mixing Processes," *日本 化學工學論文集*, 第 14 卷, 第 6 號, pp. 739~747.
- (15) Kunii, D. and Levenspile, O., 1991, *Fluidization Engineering*, 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Boston.
- (16) Davidson, J. F., Clift, R. and Harrison, D.,

- 1985, *Fluidization*, 2nd Ed., Academic Press, London, pp. 631~674.
- (17) Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, 1st Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 601~620.
- (18) Kanury, K. K., 1977, *Introduction to Combustion Phenomena*, 2nd Ed., Gordon and Breach, New York, pp. 195~216.
- (19) Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T., 1993, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, 2nd Ed., Engineering Education System, Wichita.