

유동층 연소로내 연료농도분포의 수치적 연구

(A Numerical Study on Fuel Concentration Distribution in a FBC)

이대일(홍익대학교 대학원), 박승호(홍익대학교 기계공학과), 신동신(홍익대학교 기계공학과)

Key Words : bubble and emulsion phase (기포상과 유동상), fuel concentration (연료농도), gas interchange coefficient (가스교환계수), lateral and vertical mixing (수평 및 수직방향 혼합)

ABSTRACT : A numerical study on combustion in a fluidized bed is based on three dimensional mixing and dispersion phenomena in the bed owing to the bubble growth in the vertical direction. As fluidizing velocities increase, bubble diameters increase, which activates the fuel dispersion in the bed. The combustion rates, however, reduce due to the decrease of gas exchange rates between bubble and emulsion phases. Fuel distributions in the bed are dependent on fluidizing velocities, equivalence ratios, fuel particle diameters, fuel feeding points, and the number of fuel feeders.

1. 서 론

본 연구에서는 유동층 연소로의 기본이 되고 기술적으로 가장 안정되어 있는 기포형 유동층의 해석을 통하여 연소특성 및 혼합특성을 파악하여 이를 실규모 유동층의 설계에 도움이 되고자 한다. 유동층 내부에서의 유동현상 및 연소현상에 대한 이론적인 모델을 정립하고, 비정상 지배방정식을 세우며, 이에 대한 수치적인 해석을 통하여 유동층 연소로의 유동특성 및 연소특성을 파악한다. 이전의 연구로서 1 또는 2차원 해석¹⁻⁴⁾에서는 모든 계수들의 변화가 수직방향으로 변화가 없으며, 특히 기포의 평균크기를 사용하였기 때문에 층높이가 높아질수록 연소율이 급격히 떨어지는 결과를 보이고 있다. 그러나 실제적으로는 층높이가 높아질수록 오히려 연소율은 더 좋아지므로 본 연구에서는 보다 자세한 해석을 위하여, 공기분배장치(air distributor)로부터 발생하는 기포가 수직방향으로 점차 증가하는 점을 고려하여 수직방향까지 고려한 3차원 지배방정식을 세우고 여러가지 경우의 유동층 소각로의 운전상태를 시뮬레이션하였다.

2. 본 론

유동층 소각로의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있으며, 본 연구에서는 유동층을 한 변이 W인 정방형이라 설정하였다. 유동층의 하부 바닥면의 일정 부분에서 연료가 공급되고 유동화 및 연소용 공기가 겉보기속도(superficial velocity) u_0 로 균일하게 공급된다. 해석을 위한 검사 체적은 유동화 후의 유동층 하부부터 상부까지의 평균높이이다.

2.1. 지배방정식

유동층에 대한 기본적인 물리적 가정들³⁻⁷⁾과 고체와 기체간의 2상유동 모델을 이용하여 지배방정식을 유도하였다. 기포상 내의 산소에 대한 유동은 플러그 유동(plug flow)으로 가정하여 x, y방향으로의 유동을 무시하였다. 따라서, 기포상 내의 산소에 대한 보존방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_{ab}}{\partial t} = -u_b \frac{\partial C_{ab}}{\partial z} - K(C_{ab} - C_{ae}) \quad (1)$$

유동층 내의 에멀전(emulsion)영역에서의 산소에 대한 3차원 지배방정식은

$$\epsilon_{mf} \frac{\partial C_{ae}}{\partial t} = -u_{mf} \frac{\partial C_{ae}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (D_{sh} \frac{\partial C_{ae}}{\partial x})$$

연료직경의 변화는 연소율에 커다란 영향을 미치며, Fig. 5는 연료직경의 변화가 평균 및 최대 연료 농도에 미치는 영향을 나타내었다. 연료직경이 증가함에 따라 노 내의 연료 농도는 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이는 연료 직경이 증가함에 따라 질량 대 연료입자의 표면적이 줄어들어 질량 전달 계수가 감소되고, 연소율이 줄어들어 연료농도는 증가하게 된다. 그러나 최대 연료 농도와 평균 연료 농도와의 차이는 큰 변화가 없으며, 이는 수평방향 확산계수에 대하여 연료 입자와 층 구성 입자의 직경의 차이를 고려하지 않았기 때문이다. 즉, 유동층 구성 입자와 연료입자의 직경과 밀도는 연소율의 측면에서 고려되어야 할 중요한 인자라 할 수 있다.

Fig. 6은 연료의 노내 투입개시 후 시간에 따른 유동층내 평균연료농도의 증가상태를 보여준다. 유동화속도가 140 cm/s 이하의 경우에는 연료투입 초기에 평균농도가 급격하게 증가하나, 시간이 지날수록 연소가 활발히 일어나서 연료의 투입율과 연소율이 같아지는 상태가 되어 층내의 연료농도는 일정한 상태로 수렴하게된다. 그러나 그 이상의 유동화속도의 경우에는 연소율이 연료공급율보다 상대적으로 작으므로 연료의 평균농도가 급격히 증가한다. 유동화속도가 증가하면 발생하는 기포의 크기가 커져 연료의 확산은 증가한다. 그러나 식 (8)에서 예측할 수 있듯이 발생기포의 증가에 따라 가스교환이 감소하게 되어 연소에 부정적인 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 7은 시간이 충분히 지나 수렴된 상태에서의 노내 연료농도와 산소농도를 위치에 따라 나타내고 있다. 투입면, 즉 유동층 하부에서는 노내 중심부분에서의 연료농도와 벽면에서의 연료농도의 차이가 크게 나며, 상부로 갈수록 그 차이는 점차적으로 줄어들어 유동층 상부에서는 중심이나 벽면에서의 연료의 농도가 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 유동층 상부로 갈수록 기포 직경이 커져 가스 교환 계수는 줄어들지만 확산계수는 늘어남을 알 수 있었으며, 연소가 진행됨에 따라 유동층 상부로 갈수록 확산계수의 영향이 가스 교환

계수보다 더 커짐을 알 수 있다.

유동층에서의 연료농도 분포는 연료 투입부의 위치와 투입부의 갯수에 따라 달라지게 된다. Fig. 8은 투입위치에 따른 연료의 농도분포를 나타내고 있으며, 층의 중심에서의 농도분포에 대한 값을 취하여 비교하였다. 벽면에서 투입할 경우 최대 연료농도와 최소 연료농도의 차이는 노내의 중심에서 투입할 때 매우 큰 차이를 보이며, 투입구의 위치가 벽면에서 중앙으로 갈수록 최대치와 최소치의 차이가 점점 감소함을 알 수 있다. Fig. 9는 연료 투입부의 수를 투입면의 중앙으로부터 2, 3개로 증가시킨 경우 노내 평균 연료농도 분포를 나타내고 있으며, 투입부의 수가 1개, 2개 그리고, 3개의 경우를 각각 나타내고 있다. 각 경우에 대하여 비교하여 보면, 연료 투입부의 수를 3개로 증가시킨 경우가 보다 더 균일한 농도분포를 나타내고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 간단한 연소 모델을 이용하여 유동층 소각로내 연료농도분포를 수치적으로 해석하였으며, 발생된 기포의 수직방향 특성에 따라 연료의 확산 및 연소특성이 달라지는 점을 고려한 3차원적 해석을 하였으며 그 결과를 분석하였다.

연구 결과로부터 유동층 내의 연료의 농도분포는 여러 가지 인자들에 의해 변화될 수 있음을 보였다. 유동화 속도가 증가함에 따라 연료의 확산은 증가하였으며 수직방향에 대한 기포직경의 증가에 따른 가스교환 계수가 감소로 인하여 연소율의 저하를 확인하였다. 연료의 평균농도는 유동화속도, 당량비, 연료입자의 직경 및 유동층의 높이에 의존하였고, 최대농도는 연료의 투입위치 및 투입구의 갯수에 따라 크게 변하였다. 그리고 연료의 최대농도와 평균농도의 차이는 연료의 확산특성에 큰 영향을 받았다.

기호설명

C_{ab} : 기포상내 산소농도

mol/cm^3

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\partial}{\partial y} (D_{sh} \frac{\partial C_{ae}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{sh} \frac{\partial C_{ae}}{\partial z}) \\
 & + \frac{\epsilon_b}{(1-\epsilon_b)} K(C_{ab} - C_{ae}) - \frac{6k_g}{\rho d_p} C_f C_{ae} \quad (2)
 \end{aligned}$$

이고, 유동층내 투입된 연료에 대한 지배방정식은

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C_f}{\partial t} & = \frac{\partial}{\partial x} (D_{sh} \frac{\partial C_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{sh} \frac{\partial C_f}{\partial y}) \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} (D_{sv} \frac{\partial C_f}{\partial z}) + \frac{\psi_f}{(1-\epsilon_b)} \\
 & - \frac{6k_g}{\rho d_p} C_f C_{ae} M_c \quad (3)
 \end{aligned}$$

으로 정리된다. 여기서 연료의 공급량 F에 대한 투입함수 ψ_f 는

$$\begin{aligned}
 \psi_f & = \frac{F}{N \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (\text{연료 투입체적 내부}) \\
 \psi_f & = 0 \quad (\text{연료 투입체적 외부}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

로 설정하였다. 그리고, 위의 지배방정식에 대한 초기조건과 경계조건은 벽면에서 농도 구배가 없다고 가정하여 다음과 같이 정리하였다.

$$\begin{aligned}
 t=0 : C_{ab} & = C_{ae} = C_{a0} \\
 t>0 : C_{ab} & = C_{a0} \quad \text{at } z=0 \\
 \frac{\partial C_f}{\partial x} & = \frac{\partial C_{ae}}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0, W \\
 \frac{\partial C_f}{\partial y} & = \frac{\partial C_{ae}}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=0, W \\
 \frac{\partial C_f}{\partial z} & = \frac{\partial C_{ae}}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z=H \quad (5)
 \end{aligned}$$

본 연구에서는 지배방정식에 대한 수치해법으로서 Crank-Nicolson법을 사용하였으며, 유동층의 높이는 사다리꼴 법칙을 사용하여 구하였다⁸⁾.

2.2 연소모델 및 확산모델

2.2.1 고체입자의 연소

유동층 내 고체연료의 연소는 연료입자가 층 내로 투입되고, 입자가 가열된 후 우선 입자에서 수분이 증발하고, 열분해가 일어나 휘발분과 고정탄소분으로 분리된다. 이 휘발분이 먼저 기포상내, 또는 유동층 상부의 자유단(freeboard)에서 연소

가 일어나며, 그 후에 에멀전상 (emulsion phase) 내에서 고정탄소분의 연소가 진행된다.

유동층 연소는 일반적으로 확산연소로 볼 수 있기 때문에 공기와 연료와의 접촉이 중요한 현상이 되며, 특히 연료와 공기의 혼합은 연소 반응율을 결정하는 중요한 인자가 된다. 본 연구에서는 연료입자의 고정탄소에 대한 연소⁹⁻¹¹⁾만을 고려하였으며, 이에 대한 단순화 모델인 unreacted core model을 적용^{3,4)}하면, 단일 고체 연료에 대한 반응율은 다음과 같다.

$$R_a = \frac{6k_g}{\rho_p d_p} C_f C_{ae} \quad (6)$$

2.2.2 가스교환계수

기포상과 유동층간의 가스교환은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉, 기포상과 기포 주위의 연기 (cloud)간의 가스교환이 있으며, 연기 (cloud)와 유동층 내의 에멀전(emulsion)영역과의 가스교환이다. 가스교환계수는 이러한 두 가지 계수의 조합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_{bc}} + \frac{1}{K_{ce}} \quad (7)$$

여기서 K_{bc} 는 기포와 cloud-wake 영역간의 가스교환계수, K_{ce} 는 cloud-wake 영역과 에멀전(emulsion)영역간의 가스교환계수이며 아래와 같이 표현될 수 있다⁶⁾.

$$\begin{aligned}
 K_{bc} & = 4.5 \frac{u_{mf}}{d_b} + 5.85 \left(\frac{D^{0.5} g^{0.25}}{d_b^{1.2}} \right) \\
 K_{ce} & = 6.77 \left(\frac{D \epsilon_{mf} u_{br}}{d_b^3} \right)^{0.5} \quad (8)
 \end{aligned}$$

빠른 기포($\frac{u_{br}}{u_f} < 100$)의 경우 cloud의 두께가 매우 얇아 연소가 유동층에서만 일어난다고 가정할 수 있지만 비교적 느린 기포($1 < \frac{u_{br}}{u_f} < 7$)의 경우 cloud영역이 기포상을 제외한 상당부분을 차지하므로 cloud영역의 연소를 고려하기 위하여 새로운 가스교환계수를 정의 할 필요가 있다. 삼차원

층에 대한 cloud와 기포부피의 비는 Davidson 모델¹²⁾에 의해

$$f_c = \frac{3u_f}{u_{br} - u_f} = \frac{3u_{mf}/\epsilon_{mf}}{u_{br} - u_{mf}/\epsilon_{mf}} \quad (9)$$

으로 주어지며, 새로운 가스교환계수는

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

이다. 본 연구에서는 가스교환계수를 수직방향에 대하여 기포의 직경에 따른 높이의 함수로 나타내었으며 수평방향에 대해 일정하다고 가정하였다.

2.2.3 확산계수

유동층 내에서 연료의 확산은 여러 가지에 의해 이루어지며, 우선 에멀전상(emulsion phase)에 의한 확산과 기포상의 영향에 의한 확산으로 나눌 수 있다. 에멀전상(emulsion phase)내의 확산계수는 부력과 밀도 차에 의한 확산계수로서 층 물질과 연료의 입경과 밀도의 비로써 나타나게 되고, 기포상 내의 확산계수는 기포의 움직임과 그에 따른 층 물질의 거시적인 움직임에 의한 확산계수로서 층 물질과 연료의 입경과 밀도비 뿐만 아니라, 층의 기하학적인 조건, 기공률, 유동화 속도 등이 영향을 주게 된다. 수평방향 혼합계수에 대하여 Kunii 와 Levenspiel⁶⁾은 기포크기, 연기(cloud)의 두께 등을 고려하여 다음의 식을 제안하였다.

$$D_{sh} = \frac{3}{16} \frac{\epsilon_b}{1 - \epsilon_b} \frac{a^2 u_{mf} d_b}{\epsilon_{mf}} \quad (11)$$

본 연구에서는 에멀전(emulsion)에서의 산소에 대한 수평방향 혼합계수도 이와 같다고 가정하였으며^{3,4)}, 기포직경에 따라 각각의 z방향에 따른 위치의 함수로 계산되었다.

수직방향의 혼합계수는 주로 유동사들의 거시적인 순환에 영향을 받으며, Davidson 기포모델과 연기(cloud)영역의 고체운동을 고려하여 수직방향의 혼합계수는 아래와 같이 표현될 수 있다⁶⁾.

$$D_{sv} = \frac{f_w \epsilon_{mf} \epsilon_b d_b u_b^2}{3u_{mf}} \quad (12)$$

Bellgardt와 Werther¹⁾, Van Deemter¹³⁾,

Groot¹⁴⁾등은 수직방향 혼합계수가 수평방향보다 상당히 크다는 것을 실험적으로 증명하였으며, 그 크기는 대략 1000배 정도 되는 것으로 나타난다.

2.3 해석결과 및 토론

기본적인 운전조건은 유동화속도 100cm/s, 당량비 0.7, 연료입자의 직경 3mm, 고정층의 높이 100cm으로 하였으며, 연료투입구의 갯수는 1개이다. 유동층의 단면은 $2 \times 2m^2$ 의 정방형이며, 연료의 투입은 유동층 하부 중심에서 이루어진다.

Fig. 2는 기본적인 운전조건에서의 기포의 직경을 100%라고 가정하고, 기포 직경에 따른 평균 및 최대 연료농도의 분포를 나타내고 있다. 기포 직경이 작으면 최대 연료농도는 급격히 증가하는 반면 평균 연료농도에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 기포직경이 감소하면 확산이 잘 이루어지지 않아 연료농도의 최대치는 급격히 증가하지만 직경의 감소에 따라 오히려 가스교환이 증가하여 평균 연료농도는 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 기포직경을 줄였을 때 평균 연료농도는 확산계수보다 가스교환계수의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 유동층의 한 단면에서의 연료의 농도 분포를 기포직경의 변화에 따라 나타내고 있다. 직경의 감소에 따라 최대 연료농도는 점점 증가함을 보이지만, 평균 연료농도는 감소하는 분포를 나타내며, 기포직경의 증가에 따라 확산이 커져 최대 연료농도가 낮아짐을 알 수 있다.

Fig. 4에서는 유동화 속도에 따른 유동층 내 평균 연료 농도와 최대 연료 농도의 변화를 나타내었으며, $C_{f,max}$ 는 최대, $C_{f,avg}$ 는 평균 연료농도를 나타낸다. 유속이 크면 최대 연료 농도가 급격히 증가함을 알 수 있으며, 이는 가스 교환 계수의 감소로 인하여 연소율이 저하되었기 때문이다. 그러나 유속이 증가함에 따라 최대와 평균 연료 농도의 차이는 상대적으로 감소하는데, 이는 유속의 증가로 인하여 수평방향 혼합계수가 증가하기 때문이다.

C_f	: 에멀전상 내 연료농도	g/cm^3	333-337.
C_{∞}	: 초기 산소농도	mol/cm^3	[4] 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," <i>Ind. Eng. Chem. Process Des.</i> , Vol. 20, No. 3, pp. 411-416.
D_{sh}	: 고체입자의 수평방향 확산계수	cm^2/s	[5] 김종억 외, 1994, "산업폐기물 유동층 소각방식 소각장치개발," 상공자원부.
D_{sv}	: 고체입자의 수직방향 확산계수	cm^2/s	[6] Kunii, D. and Levenspiel, O., 1991, "Fluidization Engineering" 2nd Ed., Butterworth-Heinemann, Boston.
d_p	: 연료직경	cm	[7] Qian, X., Guoguan, H., Mingjiang, N., and Kefa, C., 1988, "Lateral Dispersion of Large Particles in an Industrial-Scale Fluidized Bed Combustors," <i>The 9th Int. Symposium of FBC</i> , Vol. 1, pp. 546-553.
K	: 가스교환계수	$1/s$	[8] Hoffmann, K. A. and Chiang, S. T., 1993, <i>Computational Fluid Dynamics for Engineers</i> , 2nd Ed., Engineering Educations System, Wichita.
k_g	: 고체-기체 경계에서의 산소의 질량전달계수	cm/s	[9] Davidson, J. F., Clift, R., and Harrison, D., 1985, <i>Fluidization</i> , 2nd Ed., Academic Press, London, pp. 631-674.
M_c	: 연료의 분자량	g/mol	[10] Kuo, K. K., 1986, <i>Principles of Combustion</i> , 1st Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 601-620.
u_b	: 기포의 상승속도	cm/s	[11] Kanury, K. K., 1977, <i>Introduction to Combustion Phenomena</i> , 2nd Ed., Gordon and Breach, New York, pp. 195-216.
u_{br}	: 단일기포의 상승속도	cm/s	[12] Kunii, D. and Levenspiel, O., 1969, <i>J. Chem. Eng. Japan</i> , No. 2, p. 122.
u_f	: 최소 유동화시 유동기체의 실제속도	cm/s	[13] Deemter, J. J., 1967, in <i>Proc. Int. Symp. on Fluidization</i> , A.A.H. Drinkenburg, ed., Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p. 334.
u_{mf}	: 최소유동화속도	cm/s	[14] Groot, J. H., 1967, in <i>Proc. Int. Symp. on Fluidization</i> , A. A. Drinkenburg, ed., Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p. 348.
ϵ_b	: 기포상의 체적분율		
ϵ_{mf}	: 최소 유동화시 에멀전 상의 공극률		
ρ	: 밀도	g/cm^3	

후기

본 연구는 한국전력공사의 지원(과제관리번호:96-064)에 의하여 수행되었음을 밝히고 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 이동우, 박승호, 1997, 유동층 연소로의 스케일-업을 위한 유동층 내 연료농도분포 해석, 대한 기계학회논문집(B), Vol. 21, pp. 747-757.
- [3] 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.

- [9] Davidson, J. F., Clift, R., and Harrison, D., 1985, *Fluidization*, 2nd Ed., Academic Press, London, pp. 631-674.
- [10] Kuo, K. K., 1986, *Principles of Combustion*, 1st Ed., John Wiley & Sons, New York, pp. 601-620.
- [11] Kanury, K. K., 1977, *Introduction to Combustion Phenomena*, 2nd Ed., Gordon and Breach, New York, pp. 195-216.
- [12] Kunii, D. and Levenspiel, O., 1969, *J. Chem. Eng. Japan*, No. 2, p. 122.
- [13] Deemter, J. J., 1967, in *Proc. Int. Symp. on Fluidization*, A.A.H. Drinkenburg, ed., Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p. 334.
- [14] Groot, J. H., 1967, in *Proc. Int. Symp. on Fluidization*, A. A. Drinkenburg, ed., Netherlands Univ. Press, Amsterdam, p. 348.

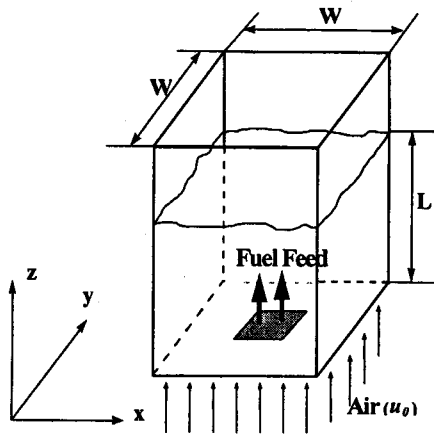


Fig. 1 Schematic diagram of a fluidized bed

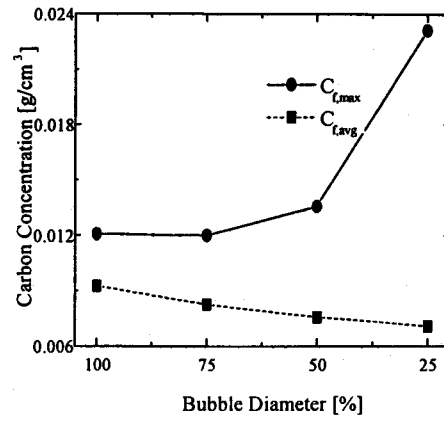
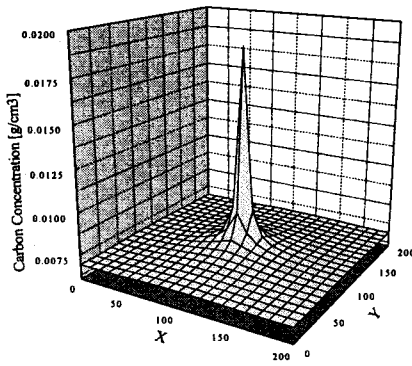
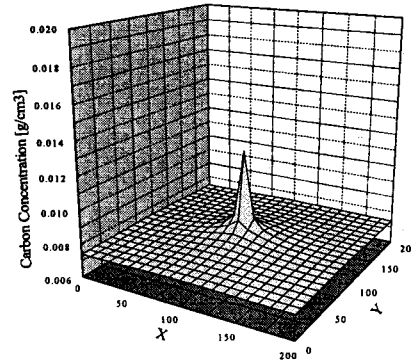


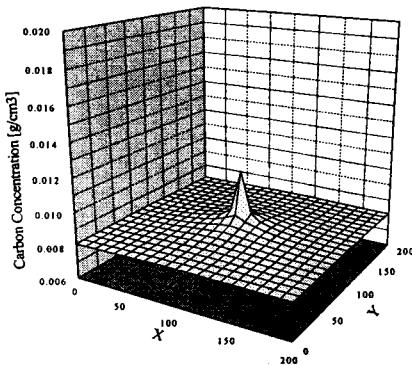
Fig. 2 Average and maximum carbon concentrations with respect to various bubble diameters



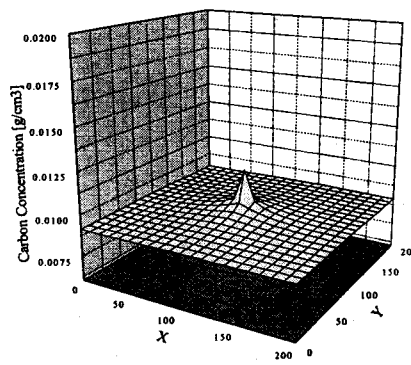
(a) D_b (25%)



(b) D_b (50%)



(c) D_b (75%)



(d) D_b (100%)

Fig. 3 Effects of bubble diameter on the carbon concentration profiles

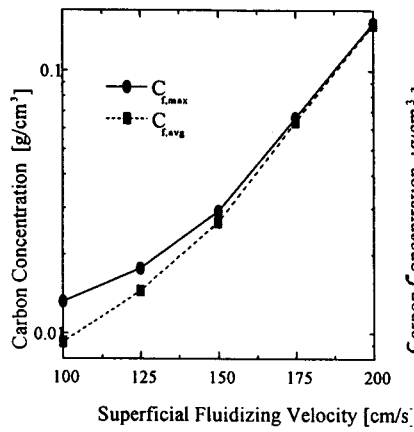


Fig. 4 Effects of operating velocity on the average and maximum carbon concentrations in the bed

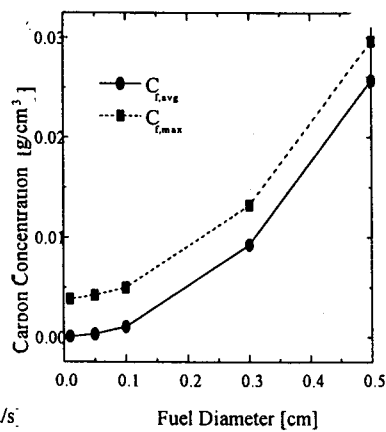


Fig. 5 Effects of fuel diameters on average and maximum carbon concentrations in the bed

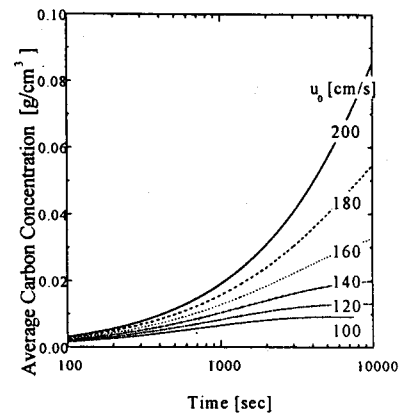
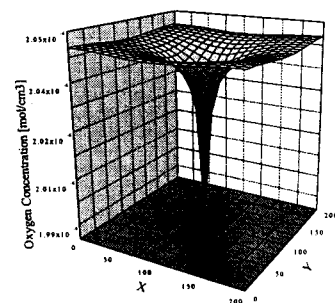
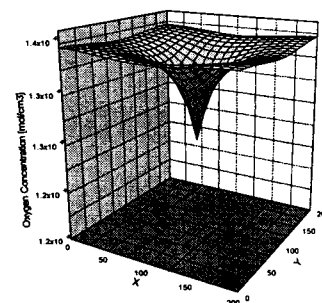
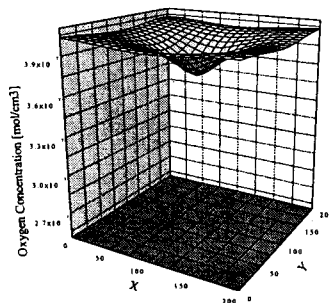
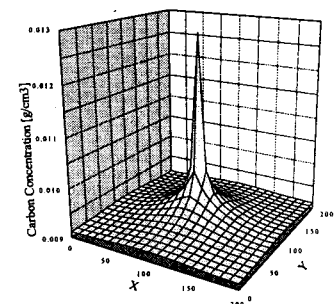
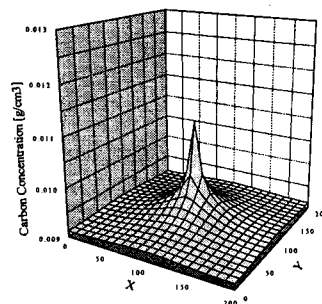
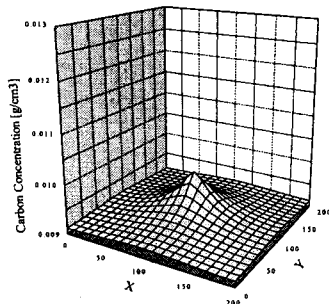


Fig. 6 Transient average carbon concentration for various operating velocities



(a) top

(b) middle

(c) bottom

Fig. 7 Steady-state carbon and oxygen concentration profiles in the bed

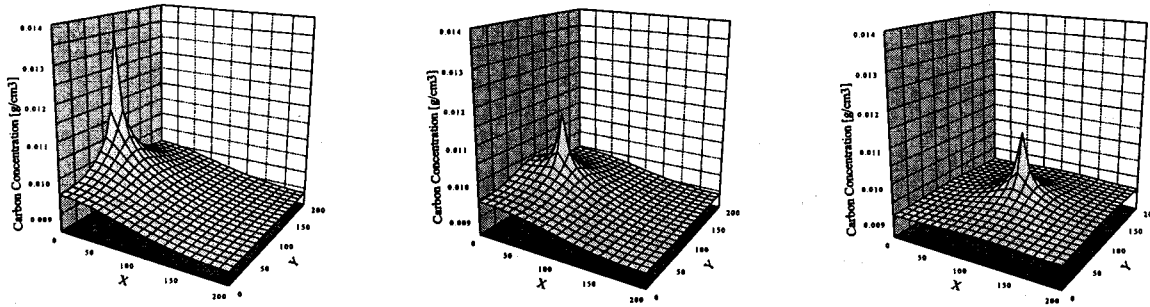
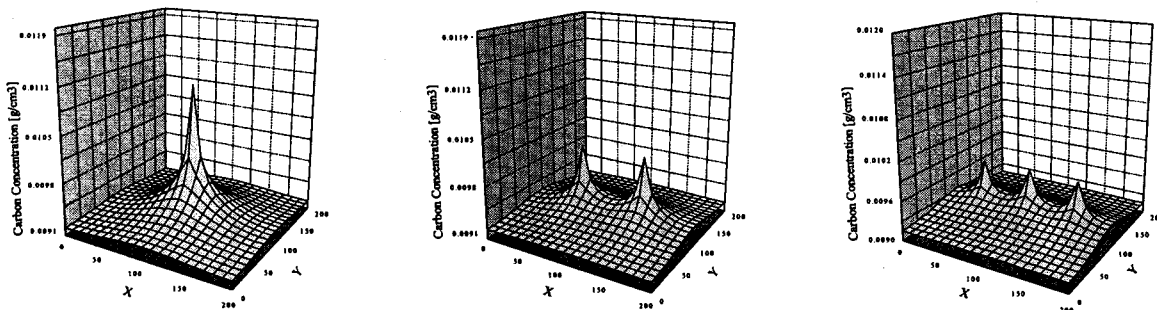


Fig. 8 Effects of the feeder position on the carbon concentration profiles in the bed



(a) feeder number: 1

(a) feeder numbers: 2

(a) feeder numbers: 3

Fig. 9 Effects of feeder numbers on the carbon and oxygen concentration profiles in the bed