

< 논문 >

연소 배출가스의 유입방식에 따른 백필터를 활용한 흡착/촉매 통합공정 시스템 반응기 내 유동특성

최 청 렬*

(2006년 10월 21일 접수, 2007년 4월 6일 심사완료)

Flow Characteristics with Inflow-Duct Types in the Reactor of an Integrated Adsorption/Catalysis Process with Bag Filters

Choeng Ryul Choi

Key Words : Adsorption/Catalytic Process(흡착촉매공정), Bag Filter(백필터), Activated Carbon(활성탄), Flue Gas(연소 배출가스), Residence Time(체류시간)

Abstract

An integrated adsorption/catalytic process has been considered to treat dioxin and NOx simultaneously. The process consists of a cyclone and a reactor with nine bag filters. In this study, numerical analysis has been performed to understand flow characteristics with inflow-duct types in the reactor. To consider flue gas and activated carbon particles simultaneously, Euler-Lagrangian model was employed. Fundamental flow patterns of flue gas and activated carbon particles, pressure distribution and distribution of activated carbon have been obtained from the numerical analysis. Also trace length and residence time of flue gas, residence time of activated carbon particles have been calculated directly. Flow patterns of flue gas and activated carbon particles in the reactor were very complicated and they moved along very various paths. Therefore, their residence time in the reactor was also various. The flow characteristics in the reactor were strongly influenced by inflow-duct types. The results obtained would be effectively used to estimate the removal efficiency in the reactor once the residence time is combined with the reaction equation.

기호설명

그리스문자

C_D	저항계수
d_p	입자 직경
F_D	입자의 저항력
G_k	난류에너지 생성
k	난류운동에너지
u	액상 속도
u_p	입자 속도
s	입자 체적과 동일한 구의 표면적
S	입자의 실제 표면적

ϵ	난류소산율
μ	유체 분자 점성계수
σ_ϵ	난류 Prandtl 수
σ_k	난류 Prandtl 수
ρ	유체 밀도
ρ_p	입자 밀도
ϕ	형상계수

1. 서론

대기오염 문제가 전 세계적인 사회문제로 대두되면서 각국의 강화된 환경오염 규제에 인하여 대기오염 방지장치의 수요가 급증하고, 고효율의 오염방지 장치의 설치가 요구되고 있다. 특히 우리

* 회원, 안양대학교 환경공학과
E-mail: choicr@empal.com
TEL: (031)476-0901 FAX: (031)476-0903

나라의 경우에는 폐기물 처리 정책이 기존에는 매립위주였으나, 현재는 소각처리의 비율이 점차 증가하고 있는 실정이다. 하지만 소각시설 인근 지역의 대기환경과 관련된 문제점 및 그로 인한 주민민원의 발생도 증가하는 추세에 있다. 특히 산업 폐기물을 처리하는 폐기물 소각장에서 발생하는 다이옥신, NO_x, 악취성 물질 등의 처리는 시급한 과제 중 하나이다. 그리하여 공정상 또는 소각시설에서 배출되는 연소 배출가스 및 폐 분진을 처리하는 기술개발을 위한 연구가 많이 수행되어 왔다.^(1,2)

산성가스를 제거하기 위하여 건조분말 상태의 흡수제를 직접 반응기에 주입하여 가스상의 오염물질을 제거하고, 후단에 전기집진기나 백필터를 설치하여 입자상의 오염물질을 제거하는 건식세정시스템이 최근에 도입되고 있다. 그러나, 기존의 단일 설비나 기술로는 소각시설에서 다량으로 발생하는 대기오염물질을 강화된 규제에 맞추어 효과적으로 제거하는 데에 어려움이 있다. 따라서 현재는 백필터를 이용하여 SO_x, NO_x, HCl, HF 등의 산성가스와 폐분진을 동시에 제거하려는 노력이 활발히 진행 중이다.^(2,3)

본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로, 기존의 백필터 시스템이 다이옥신 제거용인 것과는 달리 다이옥신과 NO_x를 동시에 제거할 수 있는 흡착/촉매 통합공정 시스템을 개발 중이다. 일반적으로 활성탄을 이용한 배출가스 처리용 공정으로는 크게 필터백 입구에 PAC(Particulate Activated Carbon)를 주입하는 분무흡착 방식과 GAC(Granular Activated Carbon)를 이용한 고정층 흡착공정으로 구분할 수 있다.^(4,5) 두 공정의 특징은 소각시설 배출가스 내의 다이옥신을 제거하기 위한 공정은 주로 PAC를 이용하여 백필터 전단에 주입하는 분무흡착공정이 주로 사용되고 있다는 것이다. 그러나 질소 산화물을 제거하는 공정에서는 주로 GAC를 이용한 고정층 반응기가 주류를 이루고 있다. 상대적으로 짧은 시간에 흡착이 일어나는 다이옥신의 경우에는 분무 흡착공정이 유리하나, 질소산화물은 산화 및 흡착에 소요되는 시간이 길어 고정층 반응기가 주로 사용된다. 그러나 고정층 반응기의 경우 설치 운영비용이 높고, 화재 위험이 높으며 아울러 편류흐름(channelling)의 발생으로 인하여 운전이 어려워 이를 동시에 처리할 수 있는 분무 흡착공정의 개발이 될 경우 우수한 공정으로 부각될 수 있다. 기존의 분무흡착 공정의 단점은 활성탄 소모가 많아 폐기물 발생량이 다소 많으며 활성탄 사용 효율이 다소 낮다는 문제점을 안고 있다. 따라서 현 단계에서는 이러한 활성탄 분무공정의 활성탄 사용 효율을 현저히 높이며 아울러 질소산화물과 다이옥신류를 높은 효율로 동시처리

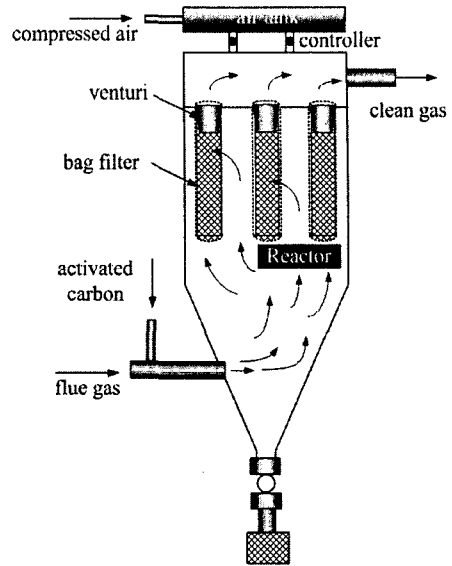


Fig. 1 Schematic diagram of an adsorptive/catalytic process for simultaneous removal of NO_x and dioxides

가능한 흡착/촉매 이중 백필터 공정을 실공정으로 개발하기 위해서 다이옥신과 NO_x를 동시처리 가능한 특수 활성탄 개발과 아울러 이를 적용할 수 있는 효율적인 분무흡착 공정 개발이 병행 되어야 한다.

현재 고려 중인 반응기를 Fig. 1에 나타내었다. 연소 배출가스는 흡착/촉매 반응기에 유입되기 전에 활성탄 주입구를 통하여 주입된 활성탄 입자와 혼합된다. 활성탄 입자와 혼합되어 흡착 반응이 일어나면서 흡착/촉매 반응기의 하부에 위치한 유입구를 통하여 반응기 내로 유입된다. 반응기 내로 유입된 연소 배출가스는 백필터에 의하여 활성탄과 분리되기 전까지 계속 흡착 반응이 이루어진다. 활성탄과 혼합된 연소 배출가스는 반응기 내에 설치된 9개의 백필터에 의하여 활성탄과 분리된다. 일정 시간 운전 후, 백필터에 흡착된 활성탄을 제거하기 위하여 상부에 설치된 air tank를 통하여 신선 공기를 역방향으로 주입하게 된다.

이와 같이 반응기 전단에 활성탄을 분무하게 되면 NO_x 및 다이옥신이 활성탄에 흡착될 수 있는 시간이 매우 짧아서 충분한 흡착반응이 발생하도록 반응시간을 연장시켜주는 것이 처리효율 향상 큰 도움을 줄 것으로 판단된다. 반응기의 최적설계를 위해서는 연소 배출가스의 유입속도가 빠르므로 반응기 내에서 연소 배출가스의 흐름은 주입구의 위치와 형태에 따라 현저히 다른 양상을 나타낼 것이므로 연소 배출가스의 유입형태에 따른 반응기 내에서의 유동장에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이후 적합한 유입방식에 따른 상세한

연구가 뒤따라야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 반응기 설계를 최적화하기 위하여 전산유체기법 (CFD)을 활용하여 반응기에 활성탄이 주입되는 경우에 연소 배출가스의 유입 방식에 따른 반응기 내에서 연소 배출가스와 활성탄 입자의 유동 특성을 해석하였고, 연소 배출가스와 활성탄 입자의 체류시간을 계산하였다.

2. 해석방법

2.1 수학적 모델링

흡착/축매 반응기 내에서의 유동해석을 위해서 수치계산은 3차원 정상상태로 가정하여 계산을 수행하였다. 연속방정식과 운동량방정식과 난류의 영향을 고려하기 위하여 standard $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였다.

반응기 내 활성탄 입자의 거동과 이 입자와 연소 배출가스와의 운동량 교환에 의한 연소 배출가스의 유동장을 예측하고자 입자의 거동해석을 위한 입자 거동방정식 (Lagrangian 기법)을 고려하여 해석을 수행하였다.

연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j'}) \quad (2)$$

위 식 (2)의 Reynolds 응력은 근사적으로 모사하였으며, Boussinesq 가설⁽⁷⁾의 Reynolds 응력은 다음과 같다.

$$-\rho \overline{u_i u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

난류운동에너지, k 와 난류소산율, ϵ 은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (5)$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k - C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

이 방정식에서, G_k 는 평균속도 구배로 인한 난류에너지 생성을 나타낸다. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 각각 난류상수이며, σ_k 와 σ_ϵ 는 k 과 ϵ 에 대한 난

류 Prandtl 수를 나타낸다.

난류점성계수, μ_t 는 k 와 ϵ 으로부터 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

그 외의 모델 상수는 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3 \quad (7)$$

입자 운동방정식

활성탄 입자의 거동을 해석하고자 입자의 운동방정식을 추가로 고려하였다. Lagrangian 격자계에서 입자 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (8)$$

여기서, F_D 는 입자의 저항력이다.

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (9)$$

여기서, u 는 액상 속도, u_p 는 입자속도, μ 는 유체의 분자점성계수, ρ 유체 밀도, ρ_p 는 입자 밀도, 그리고 d_p 는 입자직경이다. Re 는 다음과 같이 정의한다.

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (10)$$

저항계수, C_D , 는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + b_1 Re^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re}{b_4 + Re} \quad (11)$$

여기서,

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2)$$

$$b_2 = 0.0964 - 0.5565\phi$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \quad (12)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3)$$

의 Haider and Levenspiel⁽⁸⁾ 모델을 사용하였다.

형상계수, ϕ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{s}{S} \quad (13)$$

여기서, s 는 입자 체적과 동일한 구의 표면적을 나타내며, S 는 입자의 실제 표면적을 나타낸다. 해를 구하기 위하여 First-order upwind scheme과 staggered grid system을 적용하였다. 압력-속도해는

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)⁽⁹⁾를 이용하여 구하였으며, 벽면에서는 점착 (no-slip) 조건을 적용하여 정상해를 구하였다.

2.2 해석모델 및 계산조건

흡착/축매 반응기의 기본적인 3차원 형상과 유동 양식을 Fig. 2에 나타내었다. 연소 배출가스는 흡착/축매 반응기에 유입되기 전에 활성탄 주입구를 통하여 주입된 활성탄 입자와 혼합된다. 활성탄 입자와 혼합되어 흡착 반응이 일어나면서 흡착/축매 반응기의 하부에 위치한 유입구를 통하여 반응기 내로 유입된다. 반응기 내로 유입된 연소 배출가스는 백 필터에 의하여 활성탄과 분리되기 전까지 계속 흡착 반응이 이루어진다. 활성탄과 혼합된 연소 배출가스는 반응기 내에 설치된 9개의 백필터에 의하여 활성탄과 분리된다.

하부에 설치된 유입구를 통하여 유입되는 연소 배출가스의 주입속도가 약 11m/s로서 고속으로 주입되므로 주입형태에 따라 반응기 내에서 매우 복잡한 유동형태를 예상할 수가 있다. 주입방식에 따른 유동형태를 파악하기 위하여 4가지 형태에 대한 수치해석을 수행하였다. 현재 고려된 연소 배출가스의 유입방식은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 4가지의 유입방식이 고려되었다(case 1: 단일 유입구를 통하여 유입되는 경우 (a), case 2: 두 개의 지관으로 분리되어 유입되는 경우 (b), case 3: 세 개의 지관으로 분리되어 유입되는 경우 (c) 그리고 case 4: 반응기의 네 모서리에 설치된 네 개의 유입구를 통하여 유입되는 경우 (d) 이다). Case 1-3은 반응기 내에서 주 흐름의 방향을 분산시키는 효과가 있을 것으로 생각되고, case 4의 경우는 반응기 내에서 회전유동을 발생시킬 것으로 예상되므로 case 1-3과는 현저히 다른 유동형태를 보일 것으로 예측되기 때문이다. Case 3의 경우에는 사전 계산을 통하여 세 개의 지관을 통하여 유입되는 유량이 동일하도록 관경을 설정하였다. Case 4와 같은 유입방식은 주로 tangential fired boiler에 적용되는 주입방식으로서 주입방식의 특성에 의하여 반응기 내에서 회전유동이 발생함으로써 반응시간이 증가할 것으로 기대된다.

흡착/축매 반응기 내에서의 유동해석을 위하여 전술한 수치해석 기법을 사용하는 전산유체해석 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 먼저 기본 설계도면을 바탕으로 3 차원 형상을 제작하고 격자 시스템을 구성하였다 (Fig. 3과 Fig. 5). 이후 생성된 격자계를 로드하여 정상운전 조건을 적용하였다. 반응기의 유동 해석을 위하여 소요된 격자는 약 130만 셀이다. 유동해석의 정확성을 기하기 위하여 hexa와 tetra 격자를 혼용한 hybrid 격자 시스템을 구성하였다. 이후 해석에 필요한 여러

방정식과 관련된 모델들을 설정한 후 정상상태 해석을 수행하였다. 실제 계산은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 IBM 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 계산을 수행하였다.

유입되는 연소 배출가스의 유량은 $200 \text{ Nm}^3 / \text{h}$, 주입속도 11.07 m/s , 평균온도는 155°C 이고, 주입된 활성탄의 양은 0.212 kg/h , 평균입자의 직경은 $49 \mu\text{m}$, 밀도는 490 kg/m^3 , 점화온도 260°C 이다. 반응기 내의 압력강하가 $1,500 \text{ Pas}$ 라는 실험 예측값을 활용하여 수치해석 시에 필요한 압력강하 특성 값을 산정하고 이를 활용하여 해석을 수행하였다.

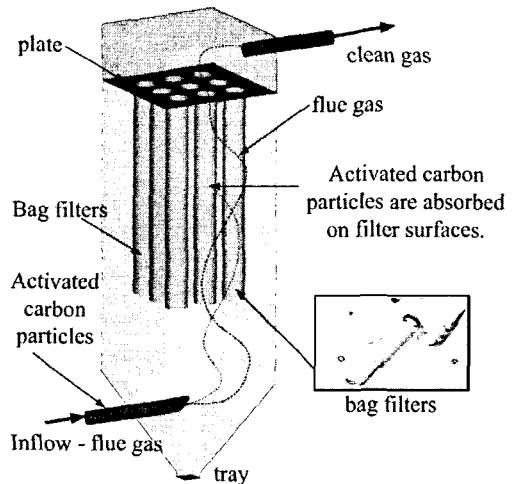


Fig. 2 Flow pattern in the reactor

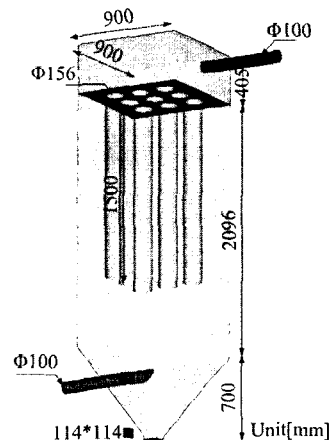


Fig. 3 Dimensions of the reactor

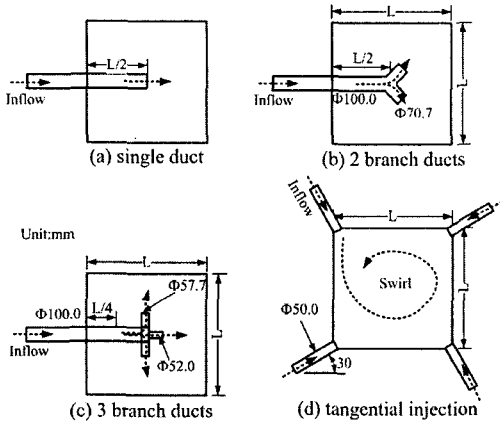


Fig. 4 Inflow duct's types of the reactor

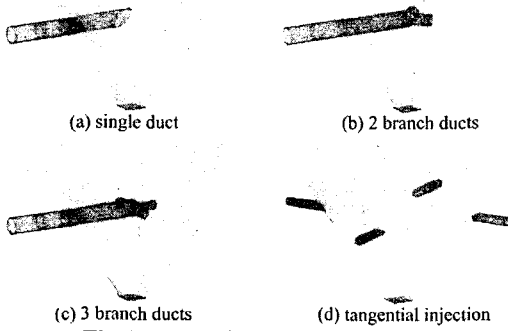


Fig. 5 3D mesh system of the reactor

3. 해석 결과

3.1 연소 배출가스 유동장

해석으로부터 얻어진 유입된 연소 배출가스의 궤적을 Fig. 6 에 나타내었다. 단일 유입구인 경우 (a), 유입구를 통하여 유입된 연소 배출가스는 유입구의 반대쪽에 위치한 벽에 부딪힌 후 사방으로 흩어지고, 반응기의 벽을 따라 반대측으로 이동하면서 상승한다. 상부로 이동하면서 백필터를 통하여 반응기의 상부로 이동 후 출구를 통하여 반응기를 빠져나간다. 유입구가 두 개인 경우 (b)는 상승하는 주유동이 유입구의 반대측에 위치한 두 모서리를 따라서 발생하였다. 하지만 유입구가 세 개인 경우 (c)와 tangential 인 경우 (d)는 반응기의 하부에서 상당히 복잡한 유동장이 관찰되며, 특히 tangential 인 경우에는 회전유동이 관찰된다.

반응기의 수평 단면에서의 속도 벡터를 Fig. 7에 나타내었는데, 상기에 기술한 각각의 유입방식에 따른 반응기 내 유동특성이 명확히 관찰된다. 모든 경우에 반응기 내에서 상부로 갈수록 유동은 약화가 되지만, 백필터 내부의 유동은 상부로 갈

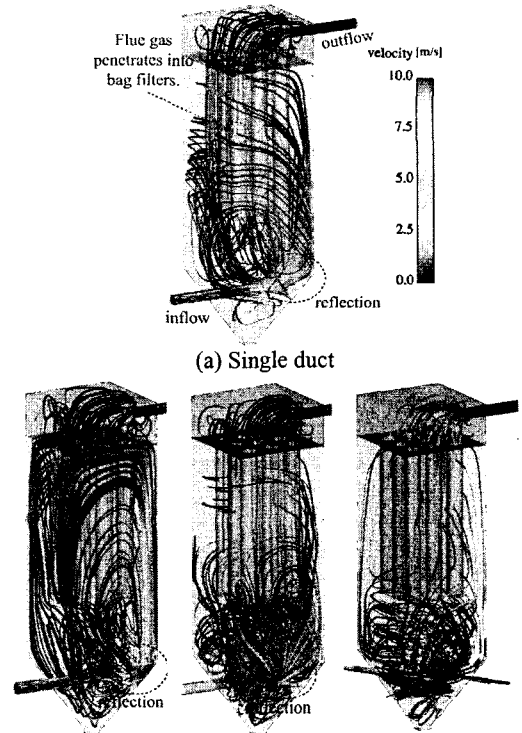


Fig. 6 Pathlines of flue gas in the reactors

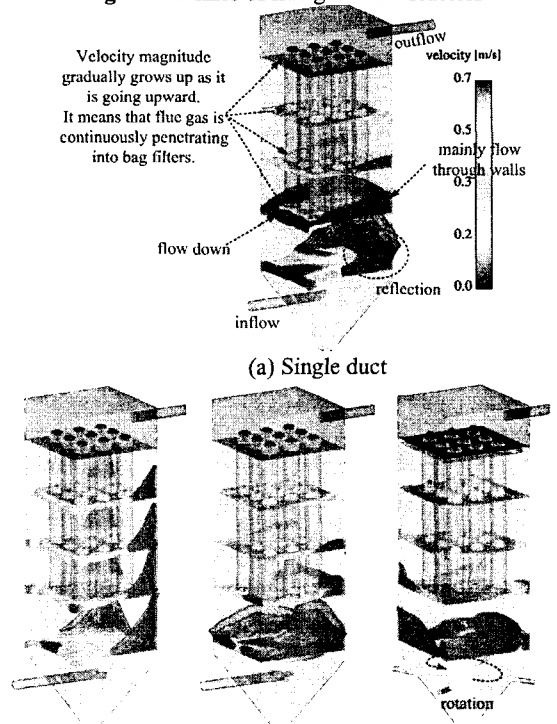


Fig. 7 Velocity vectors of flue gas in the reactors

수록 강화가 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 백 필터가 설치된 부분의 반응기에서는 유동이 다소 안정적으로 유지되는 것을 볼 수가 있다. 이는 백필터를 통하여 연소 배출가스가 지속적으로 유입되기 때문이다.

백필터 내부의 속도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 필터 내부에서 상부로 올라 갈수록 유동량이 증가하는 것을 볼 수가 있으며, 백필터에 수직인 방향으로 연소 배출가스가 지속적으로 유입되는 것을 볼 수가 있다. 백필터 면을 통하여 유입되는 연소 배출가스의 유입속도는 약간의 차이가 있으나 거의 동일한 속도로 유입되었다. 각각의 필터의 출구에서 유량을 산정해본 결과, 각각의 필터를 통한 연소 배출가스의 유량을 다소간의 차이는 있으나 거의 동일함을 확인할 수가 있다.

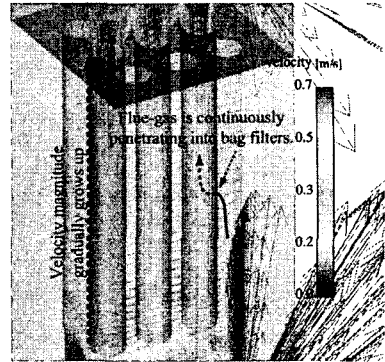


Fig. 8 Velocity vectors of flue gas in the bag filters

3.2 연소 배출가스 체류시간

반응기 내 연소 배출가스의 체류시간을 평가하기 위하여 Fig. 9에 연소 배출가스의 궤적을 체류 시간에 따라 색상화하여 나타내었다. 앞서 살펴본 바와 같이, 하부에 설치된 연소 배출가스의 유입구를 통하여 유입된 연소 배출가스가 반응기 내에서 이동하는 경로가 매우 다양하므로 반응기 내에서 체류하는 시간 또한 매우 다양하게 나타났다. 유입된 연소 배출가스의 일부는 매우 복잡한 경로를 따라 반응기 내를 흐름으로 인해서 상당히 긴 체류 시간을 가지는 경우도 있었다. 유입된 연소 배출가스의 반응기 내 궤적의 길이를 Table 1에 정리하여 나타내었고, Fig. 10에 그래프로 나타내었다. 반응기 내 연소 배출가스의 평균 궤적의 길이는 case 1: 7.4m, case 2: 8.1m, case 3: 8.4m 그리고 case 4: 5.4m로 tangential 방식인 case 4의 경우가 가장 짧게 나타났다.

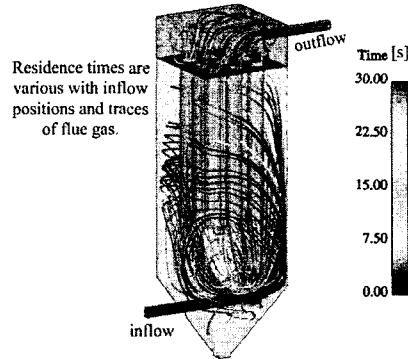
유입된 연소 배출가스의 반응기 내 체류시간을 Table 2에 정리하여 나타내었고, Fig. 11에 그래프로 나타내었다. 반응기 내 연소 배출가스의 평균 체류시간은 case 1: 18.4초, case 2: 16.7초, case 3: 19.9초 그리고 case 4: 16.3초로 tangential 방식인 case 4의 경우가 가장 짧게 나타났다.

산정된 연소 배출가스의 궤적길이와 체류시간을 활용하여 평균속도를 계산해보면, case 1: 0.4m/s, case 2: 0.49m/s, case 3: 0.42m/s 그리고 case 4: 0.33m/s로 tangential 방식인 case 4의 경우가 가장 느리게 나타났다.

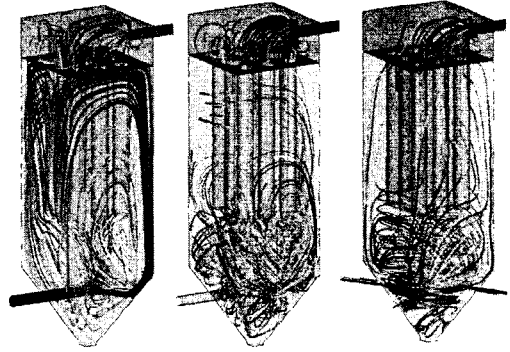
앞서 언급한 바와 같이 반응기 내에서 연소 배출가스의 궤적길이와 체류시간이 매우 다양하게 분포하므로 반응기 내에서의 이론 제거 효율을 산정함에 있어서, 정확한 data의 사용이 매우 중요함을 알 수 있다.

3.3 압력분포

반응기 내의 압력변화를 보기 위하여 Fig. 12에 반



(a) Single duct



(b) 2 ducts (c) 3 ducts (d) Tangential
Fig. 9 Residence time of activated carbon particles in the reactors

응기 내에서의 압력을 나타내었다. 반응기 내의 압력변화는 크게 백필터의 전단과 후단으로 크게 나누어지는 것을 볼 수가 있다. 주 압력강하는 백필터에 의하여 발생한다는 것을 알 수가 있다.

반응기 내 유동 속도값이 그리 크지 않으므로 동압의 크기는 정압에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 동압의 불균일한 분포가 전체 압력분포에 미치는 영향은 매우 적었다. 반응기 내 전체 압력강하는 유입방식에 따라 큰 차이는 발생하지 않았다. 백필터의 표면에 작용하는 압력의 분포는

Table 1 Trace length of flue gas

length [m]	ratio [%]			
	single duct	2 ducts	3 ducts	tangential
0<L<2.5	8.6	5.3	5.1	6.9
2.5<L<5	52.0	23.8	36.8	57.7
5<L<7.5	12.2	16.2	12.7	15.4
7.5<L<10	7.7	20.9	15.1	11.5
10<L<12.5	3.2	24.5	9.5	4.2
12.5<L<15	3.0	3.6	6.4	1.4
15<L<17.5	2.3	2.6	5.4	1.3
17.5<L<20	1.5	1.0	3.8	0.7
20<L<22.5	0.6	0.7	2.3	0.4
22.5<L<25	0.9	0.7	0.6	0.2
25<L	8.0	0.7	2.4	0.2
average [m]	7.4	8.1	8.4	5.4

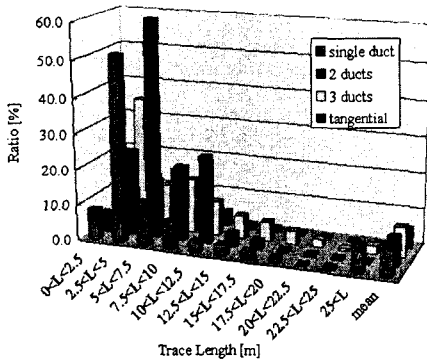


Fig. 10 Trace length of flue gas

Table 2 Residence time of flue gas

time [s]	ratio [%]			
	single duct	2 ducts	3 ducts	tangential
0<t<5	9.5	9.9	7.7	10.3
5<t<10	10.4	21.2	10.3	15.6
10<t<15	26.1	10.6	18.3	20.2
15<t<20	18.4	25.2	20.9	20.6
20<t<25	11.0	17.2	15.0	14.9
25<t<30	11.0	8.9	11.2	13.3
30<t<35	5.1	2.3	7.4	3.4
35<t<40	2.9	2.0	2.9	1.0
40<t<45	1.8	0.7	3.0	0.4
45<t<50	1.1	0.7	1.1	0.1
50<t	2.6	1.3	2.4	0.2
average [s]	18.4	16.7	19.9	16.3

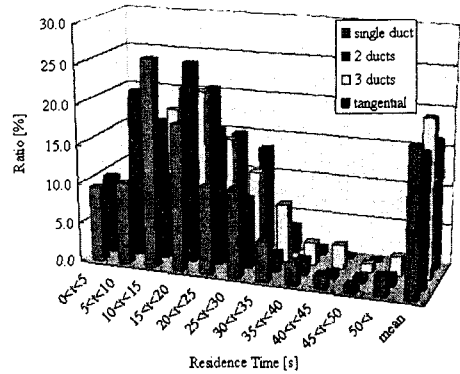


Fig. 11 Residence time of flue gas

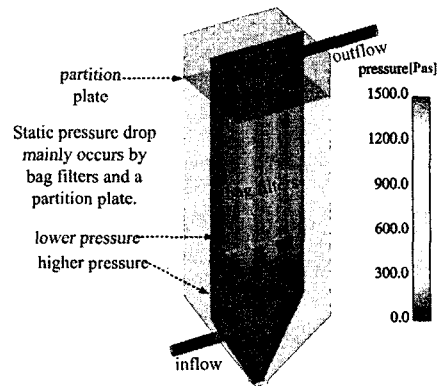
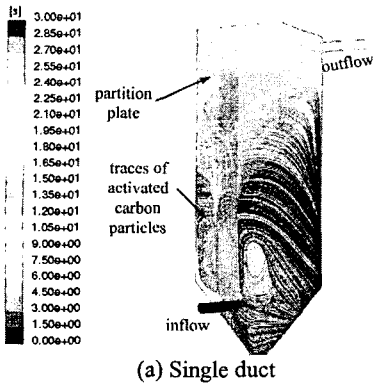


Fig. 12 Pressure distribution in the reactor

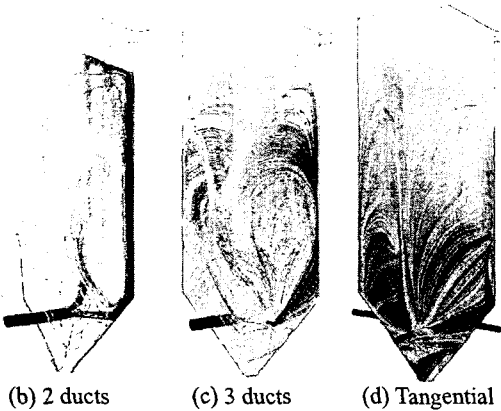
거의 동일한 것으로 관찰되었기 때문에 백필터에 작용하는 힘 또한 거의 균일하게 분포할 것을 예상할 수 있다.

3.4 활성탄 궤적 및 체류시간

활성탄 입자의 궤적을 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 연소 배출가스의 궤적과 함께 비교해 보면, 유입된 활성탄 입자는 연소 배출가스의 유동이 강한 하부영역에서는 연소 배출가스의 궤적과 거의 유사하게 이동한다. 하지만 유동이 약한 영역에 이르러서는 입자들의 질량이 연소 배출가스에 비하여 상당히 무겁기 때문에 관성력과 자중에 의하여 연소 배출가스와는 다른 이동 경로를 가지는 것을 볼 수가 있다. 반응기 내를 이동하던 활성탄 입자는 설치된 백필터의 표면에 흡착되는 것을 볼 수가 있다. 활성탄 입자의 유입위치와 그에 따른 경로의 다양성으로 인하여 어떤 입자는 주입 후 바로 백필터에 흡착이 되기도 하고, 매우 복잡한 궤적을 따라 이동 후에 백필터의 표면에 흡착되었다. 이에 따라 활성탄 입자가 반응기 내에 체류하는 체류 시간이 매우 다양하게 되는 것이다.



(a) Single duct



(b) 2 ducts (c) 3 ducts (d) Tangential

Fig. 13 Traces of activated carbon particles in the reactor

Table 3 Residence time of activated carbon particles

time [s]	ratio [%]			
	single duct	2 ducts	3 ducts	tangential 1
0<t<2	0.0	0.0	0.3	0.0
2<t<4	0.0	0.0	1.3	0.0
4<t<6	0.0	0.3	0.0	0.5
6<t<8	0.0	0.3	1.1	4.5
8<t<10	3.8	13.6	0.8	8.8
10<t<12	12.5	18.1	8.0	13.6
12<t<14	15.7	25.1	15.5	11.0
14<t<16	11.1	9.4	12.9	7.5
16<t<18	10.0	9.8	11.3	9.3
18<t<20	5.1	8.7	5.9	10.1
20<t<22	5.7	5.9	4.0	8.1
22<t<24	6.2	2.4	5.1	7.2
24<t<26	10.3	3.5	6.2	3.5
26<t<28	3.5	1.7	5.1	5.0
28<t<30	3.5	0.0	1.3	3.5
30<t	12.2	1.0	9.4	7.5
average [s]	19.1	14.7	16.3	17.6

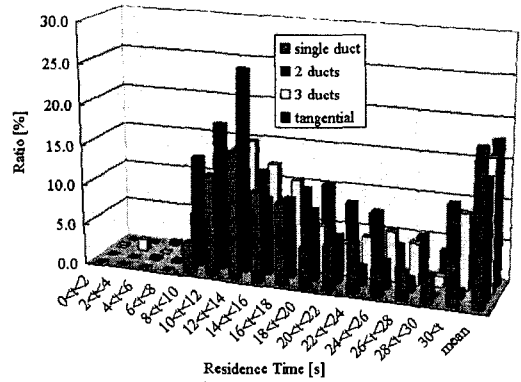
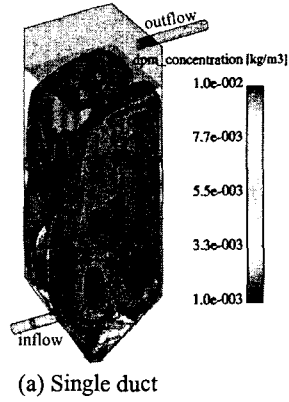
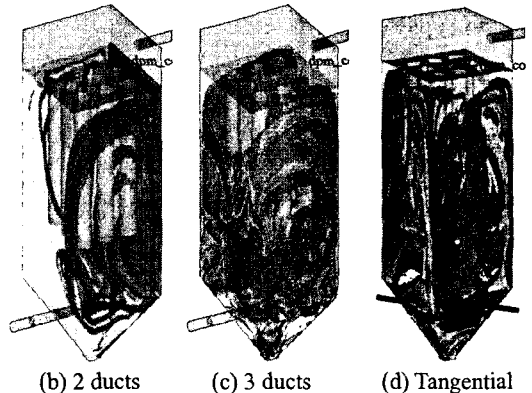


Fig. 14 Residence time of activated carbon particles



(a) Single duct



(b) 2 ducts (c) 3 ducts (d) Tangential
Fig. 15 Iso-surface of activated carbon in the reactor

반응기 내에 주입된 활성탄 입자의 체류시간을 Table 3과 Fig. 14에 나타내었다. 반응기 내 활성탄 입자의 평균 체류시간은 case 1: 19.1초, case 2: 14.7초, case 3: 16.3초 그리고 case 4: 17.6초로 case 2의 경우가 가장 짧게 나타났다. 30초 이상 반응기 내에 체류하는 입자도 관찰되었다. 이런 입자들은 매우 복잡한 경로를 따라 이동하기 때문에 반응기 내 체류시간이 길어지는 것으로 예상된다.

3.5 활성탄 분포

반응기 내 활성탄 농도의 iso-surface를 Fig. 15에 나타내었다. 반응기 내 고농도 영역과 저농도 영역이 상부 혹은 하부로 구획 지어져 있는 것이 아니라 전체적으로 고농도 영역과 저농도 영역이 부분적으로 공존하며, 그 영역의 크기만이 부분적으로 차이가 나는 것을 볼 수가 있다. 이러한 경향은 반응기 내에서 활성탄 입자의 궤적이 매우 다양하기 때문으로 생각된다.

상대적으로 고농도 영역의 위치는 연소 배출가스의 주유동과 이에 따른 활성탄입자의 궤적과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 활성탄 입자는 연소 배출가스에 비하여 관성력이 크므로 반응기 내에 회전 시 더욱 큰 원심력을 가지기 때문에 주로 벽측을 따라 움직이게 된다. 따라서 현재의 분포를 보면 고농도 영역의 위치가 활성탄이 주궤적과 거의 일치하는 것을 볼 수가 있다.

4. 결론

다이옥신과 NOx를 동시에 제거할 수 있는 흡착/축매 통합공정 시스템의 흡착/축매 반응기 내에서의 연소 배출가스의 활성탄에의 흡착효율은 연소 배출가스의 반응기 내 체류 시간이 매우 중요한 영향을 미치게 된다. 그래서 본 연구에서는 반응기 내 유동 특성을 파악하고, 연소 배출가스와 활성탄 입자의 반응기 내 체류시간을 산정하기 위하여 전산유체기법을 활용하여 해석을 수행하였다. 이를 위하여 네 가지 방식의 연소 배출가스 주입방식이 고려되었고, 각각의 주입 방식에 따른 반응기 내 유동특성과 체류시간을 비교하고 평가하였다.

연소 배출가스의 유입방식에 따라 반응기 내 유동 특성이 크게 변화하였다. 단일 유입구인 경우는 유입구를 통하여 유입된 연소 배출가스는 유입구의 반대쪽에 위치한 벽에 부딪힌 후 사방으로 흩어지고, 반응기의 벽을 따라 반대측으로 이동하면서 상승한다. 상부로 이동하면서 백필터를 통하여 반응기의 상부로 이동 후 출구를 통하여 반응기를 빠져나갔다. 유입구가 두 개인 경우는 상승하는 주유동이 유입구의 반대측에 위치한 두 모서리를 따라서 발생하였다. 하지만 유입구가 세 개인 경우와 tangential 인 경우는 반응기의 하부에서 상당히 복잡한 유동장이 관찰되며, 특히 tangential 인 경우에는 회전유동이 관찰되었다.

이와 같이 유입방식에 따라 반응기 내 유동양식이 현저히 변화함에 따라 반응기 내 연소 배출가스의 체류시간 및 활성탄 입자의 체류시간에 큰 차이가 발생하였다. 반응기 내 연소 배출가스의 평균 궤적의 길이는 case 1: 7.4m, case 2: 8.1m, case 3: 8.4m 그리고 case 4: 5.4m로 tangential 방식인

case 4의 경우가 가장 짧게 나타났고, 평균 체류시간은 case 1: 18.4초, case 2: 16.7초, case 3: 19.9초 그리고 case 4: 16.3초로 tangential 방식인 case 4의 경우가 가장 짧게 나타났다. 산정된 연소 배출가스의 궤적길이와 체류시간을 활용하여 평균속도를 계산해 보면, case 1: 0.4m/s, case 2: 0.49m/s, case 3: 0.42m/s 그리고 case 4: 0.33m/s로 tangential 방식인 case 4의 경우가 가장 느리게 나타났다. 유입된 연소 배출가스의 일부는 매우 복잡한 경로를 따라 반응기 내를 흐름으로 인해서 상당히 긴 체류시간을 가지는 경우도 있었다.

반응기 내 활성탄입자의 평균 체류시간은 case 1: 19.1초, case 2: 14.7초, case 3: 16.3초 그리고 case 4: 17.6초로 case 2의 경우가 가장 짧게 나타났다. 30초 이상 반응기 내에 체류하는 입자도 관찰되었다. 이런 입자들은 매우 복잡한 경로를 따라 이동하기 때문에 반응기 내 체류시간이 길어진 것으로 판단된다.

유입된 활성탄 입자는 연소 배출가스의 유동이 강한 하부영역에서는 연소 배출가스의 궤적과 거의 유사하게 이동하지만 유동이 약한 영역에 이르러서는 입자들의 질량이 연소 배출가스에 비하여 상당히 무겁기 때문에 관성력과 자중에 의하여 연소 배출가스와는 다른 이동 경로를 가졌다. 반응기 내 고농도 영역과 저농도 영역이 상부 혹은 하부로 구획 지어져 있는 것이 아니라 전체적으로 고농도 영역과 저농도 영역이 부분적으로 공존하며, 그 영역의 크기만이 부분적으로 차이가 발생하였다. 이러한 경향은 반응기 내에서 활성탄 입자의 궤적이 매우 다양하기 때문으로 생각된다. 반응기 내의 압력변화는 크게 백필터의 전단과 후단으로 크게 나누어지는 것을 볼 수가 있다. 주압력강하는 백필터에 의하여 발생하였다.

반응기 내로의 연소 배출가스의 유입방식에 따라 산정된 연소 배출가스의 체류시간은 3 개의 지관으로 나뉘어 유입시키는 방식이 가장 길게 나타났다. 하지만 반응기 내에서 연소 배출가스의 흡착효율은 기본적으로는 연소 배출가스의 체류시간이 긴 경우가 뛰어나지만, 접촉하는 활성탄 입자의 농도와도 밀접한 관계가 있으므로 이에 대한 종합적인 평가가 요구된다. 현재 산정된 연소 배출가스 및 활성탄 입자의 체류시간을 바탕으로 활성탄의 반응식과 적절히 조합한다면 정확한 제거 효율의 산정이 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Park, B.H. and Jo, Y.M., 2004, "Dedusting Efficiency in Bag-filter System," *Spring Proceeding of KOSAE(2004)*, pp. 449~450.

- (2) Lee, S.K, Lee, S.C., Jeong, K.S. and Han, Y.W., 1997, "An Experimental Study of SO₂ Removal in a Bag Filter," *Proceeding of KOSAE(1997)*, pp. 129 ~ 130.
- (3) Cooper, C. David and Alley, F. C., "Air pollution control (third edition)," 2002, Waveland Press.
- (4) Yoon, S.H. and Lee, S.K., 2004, "Simultaneous Control of Multi-pollutants in a Bagfilter," *Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE(2004)*, pp. 233 ~ 234.
- (5) Motoyuki Suzuki, 1990, "Absorbtion Engineering," Kodansha Ltd. and Elsevier Science Publishers.
- (6) Choi, C.R. and Kim, C.N., 1999, "Thermohydraulic Characteristics of Two-Phase Flow in a Submerged Gas Injection System," *Journal of KSME*, Vol. B23, No. 10, pp 1327 ~ 1339.
- (7) Hinze, J.O., 1975, "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., New York.
- (8) Haider and Levenspiel, O., 1989, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technology*, Vol. 58, pp. 63 ~ 70.
- (9) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, Washington, D.C.