

< 논문 >

흡착/촉매 공정개선을 위한 사이클론 내 유동특성 및 활성화탄 체류시간 산정

최 청 렬*

(2006년 10월 29일 접수, 2007년 4월 6일 심사완료)

Flow Characteristics and Residence Time of Activated Carbon in the Cyclone for Optimized Design of an Adsorption/Catalysis Reactor

Choeng Ryul Choi

Key Words : Adsorption/Catalytic Process(흡착촉매공정), Activated Carbon(활성탄), Cyclone(사이클론), Flue Gas(연소가스), Residence Time(체류시간)

Abstract

In adsorption/catalytic process, numerical analysis has been performed to identify the flow characteristics of flue gas in the cyclone and to estimate the residence time of activated carbon using Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. To consider flue gas and activated carbon particles simultaneously, Euler-Lagrangian model was employed so that residence time could be obtained from the numerical analysis directly. The numerical analysis has been performed with different three particle sizes and compared each flow characteristics with particle's size. Fundamental flow patterns of flue gas and activated carbon particles, pressure distribution, residence time of flue gas, and activated carbon particles and distribution of activated carbon have been obtained from the numerical analysis.

기호설명

A_{in} : 입구면적
 $C_{1\varepsilon}$: 난류상수 ($C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$)
 C_D : 저항계수
 d_p : 입자 직경
 D_h : 수력직경
 F_D : 입자의 저항력
 G_k : 난류에너지 생성
 I : 난류강도
 k : 난류운동에너지

l : turbulence length scale

p : 돌레 길이

Re : 레이놀즈 수

s : 입자 체적과 동일한 구의 표면적

S : 입자의 실제 표면적

u : 유체 속도

u_p : 입자 속도

그리스문자

ε : 난류소산율

μ : 유체 분자 점성계수

μ_t : 난류 점성계수

σ_ε : 난류 Prandtl 수

σ_k : 난류 Prandtl 수

ρ : 유체 밀도

ρ_p : 입자 밀도

ϕ : 형상계수

† 회원, 안양대학교 환경공학과

E-mail : choicr@empal.com

TEL : (031)476-0901 FAX : (031)476-0903

1. 서론

각종 산업활동에서 다량 배출되는 산성가스 및 폐 분진과 같은 대기 오염물질은 대기환경을 더욱 악화시키고, 인체의 건강, 생활환경 그리고 자연생태계에 악영향을 미치고 있다. 특히 산업체나 소각시설 주변에서는 이러한 대기오염으로 인한 피해가 심각하여 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 그리하여 공정상 또는 소각시설에서 배출되는 연소가스 및 폐 분진을 처리하는 기술개발을 위한 연구가 많이 수행되어 왔다.⁽¹⁾

최근에는 산성가스를 제거하기 위하여 건조분말상태의 흡수제를 직접 반응기에 주입하여 가스상의 오염물질을 제거하고, 후단에 전기집진기나 백필터를 설치하여 입자상의 오염물질을 제거하는 건식세정 시스템이 사용되고 있다. 그러나, 기존의 단일 설비나 기술로는 발전소, 소각시설 및 화학산업공정 등에서 다량으로 발생하는 대기오염물질을 강화된 규제에 맞추어 효과적으로 제거하는 데에 어려움이 있다. 따라서 현재는 백필터를 이용하여 SOx, NOx, HCl HF 등의 산성가스과 폐분진을 동시에 제거하려는 노력이 활발히 진행 중이다.^(1,2)

기존의 백필터 시스템이 다이옥신 제거용인 반면에, 본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로 다이옥신과 NOx를 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. 두 공정의 특징은 소각시설 배출가스 내의 다이옥신을 제거하기 위한 공정으로 PAC를 이용하여 백필터 전단에 주입하는 분무흡착공정이 주로 사용되고 있다는 것이다. 그러나 질소 산화물을 제거하는 공정에서는 GAC를 이용한 고정층 반응기가 주류를 이루고 있다.

상대적으로 짧은 시간에 흡착이 일어나는 다이옥신의 경우에는 분무 흡착공정이 유리하나 질소 산화물은 산화 및 흡착에 소요되는 시간이 길어 고정층 반응기가 주로 사용된다. 그러나 고정층 반응기의 경우 설치 운영비용이 높고, 화재위험이 높으며 아울러 편류흐름(channelling)의 발생으로 인하여 운전이 어려워 이를 동시에 처리할 수 있는 분무 흡착공정이 개발될 경우 우수한 공정으로 부각될 수 있다.

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

효율적인 분무흡착공정의 개발을 위해서는 흡착/촉매 장치의 공정 설계가 매우 중요하다. 백필터 전단에 활성탄을 분무하게 되면 NOx 및 다이옥신이 활성탄에 흡착될 수 있는 시간이 매우 짧기 때문에 충분한 흡착반응이 발생하도록 반응시간을 최적화하는 것이 처리효율 향상에 매우 중요하기 때문이다. 그래서 반응기에 연소가스가 주입되기 이전 단계인 사이클론에서도 활성탄을 주입하여 사전반응이 이루어지는 공정을 추가로 시도하고 있다(Fig. 1).

이에 본 연구에서는 전산유체기법(CFD)을 활용하여 사이클론에 활성탄이 주입된 경우에 사이클론 내에서 연소가스와 활성탄 입자의 유동 특성을 해석하였다. 또한 사이클론 내 연소가스와 활성탄 입자의 체류시간을 계산하였다. 계산된 활성탄입자의 체류시간은 활성탄에의 흡착효율을 산정하고 이를 바탕으로 최적 시스템의 설계에 사용될 수 있을 것이다.

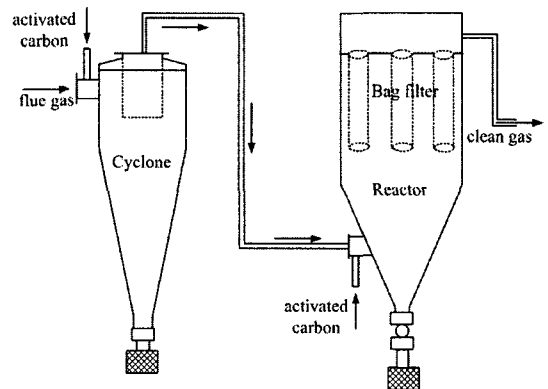


Fig. 1 Schematic diagram of an adsorptive/catalytic process for simultaneous removal of NO_x and dioxides

2. 해석방법

2.1 수학적 모델링

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

연소가스 내 활성탄 입자의 거동과 이 입자와 연소가스와의 운동량 교환에 의한 연소가스의 유동장을 예측하고자 입자의 거동해석을 위한 입자 거동방정식(Lagrangian 기법)을 고려하여 해석을 수행하였다.

연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식은 다음과 같다.⁽³⁾

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

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

위 식 (2)의 Reynolds 응력은 근사적으로 모사하였으며, Boussinesq 가설⁽⁴⁾의 Reynolds 응력은 다음과 같다.

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

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k - C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

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 난류 Prandtl 수를 나타낸다.

난류점성계수, μ_t 는 k 와 ϵ 으로부터 계산된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{6}$$

그 외의 모델 상수는 다음과 같다.

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

입자 운동방정식

사이클론 내 활성탄 입자의 거동을 해석하고자 입자의 운동방정식을 추가로 고려하였다.

Lagrangian 격자계에서 입자 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, F_D 는 입자의 저항력이다.

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

여기서, u 는 유체 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.

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \tag{10}$$

저항계수, C_D , 는 다음과 같다.

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

여기서,

$$\begin{aligned} b_1 &= \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \\ b_2 &= 0.0964 - 0.5565\phi \end{aligned} \tag{12}$$

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

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

의 Haider and Levenspiel⁽⁵⁾ 모델을 사용하였다.

형상계수, ϕ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{s}{S} \tag{13}$$

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)⁶⁾를 이용하여 구하였으며, 벽면에서는 점착(no-slip) 조건을 적용하여 정상해를 구하였다.

2.2 해석모델 및 계산조건

소각시설에서 배출된 연소가스는 상단에 위치한 유입구를 통하여 사이클론으로 유입되며, 유입된 연소가스는 사이클론의 특성에 의하여 하부로 회전 유동을 한다. 이 과정에서 활성탄 입자들은 중력에 의하여 바닥으로 향하고 연소가스는 상부에 위치한 유출구를 통하여 배출되는 과정을 거쳐 연소가스와 활성탄이 분리된다.(Fig. 2)

사이클론 및 흡착/축매 반응기 내에서의 유동 해석을 위하여 전술한 수치해석 기법을 사용하여 상용 전산유체해석 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 먼저 기본 설계도면을 바탕으로 3차원 형상을 제작하고 격자 시스템을 구성하였다.(Fig. 3~4) 이후 생성된 격자계를 로드하여 정상운전 조건을 적용하였다. 이후 해석에 필요한 여러 방정식과 관련된 모델들을 설정한 후 정상상태 해석을 수행하였다. 실제 계산은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 IBM 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 계산을 수행하였다.

유입되는 연소가스의 유량은 $200 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ 이고 주입된 활성탄의 양은 0.212 kg/h 이다. 유동해석을 위하여 4가지 경우에 대한 해석이 수행되었다. Case 1은 활성탄의 주입이 없는 경우이고, Case 2~4의 경우는 주입되는 활성탄 입자의 직경이 각각 $43 \mu\text{m}$, $49 \mu\text{m}$, $74 \mu\text{m}$ 인 경우이다. 해석에서 사용된 입자의 직경은 수치해석에 앞서서 수행된 laboratory-scale test 장치에서 수행된 실험에서 사용된 활성탄 입자의 직경과 동일하게 설정하였다. 활성탄 입자의 밀도는 490 kg/m^3 , 입자크기는 200-325 mesh ($43\text{-}74 \mu\text{m}$), 점화온도는 260°C 이다. 해석에 사용된 연소가스의 밀도는 $\rho = 0.825 \text{ m}^3 / \text{s}$, 점성계수는 $\mu = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다. 이를 바탕으로 Reynolds number를 계산해보면 32,790로서 완전난류영역에 해당되는 것을 알 수 있다.

본 해석에서 사이클론의 입구, 출구, 벽 부분에 적용된 주요 parameter들과 해석조건을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Analysis conditions

inlet	velocity	$u_{in} = 7.11 \text{ m/s}$
	area	$A_{in} = 1.225 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
	perimeter	$p = 2(0.07 + 0.175) = 0.49 \text{ m}$
	hydraulic diameter	$D_h = \frac{4A_{in}}{p} = 0.1 \text{ m}$
	turbulence length scale	$l = 0.07 D_h = 0.007 \text{ m}$
	Reynolds number	$Re_D = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} = 32,790$
	turbulence intensity	$I_{in} = \frac{u'}{u_{in}} = 0.16 (Re_D)^{-1/8}$ $= 0.044 (4.4\%)$
	turbulence kinetic energy	$k_{in} = \frac{3}{2} (I_{in} \times u_{in})^2 = 0.144 \text{ m}^2 / \text{s}^2$
turbulence dissipation rate	$\epsilon_{in} = C_{\mu} \frac{3}{4} \frac{k_{in}^{3/2}}{l} = 1.286 \text{ m}^2 / \text{s}^2$	
outlet	pressure condition	constant
wall	fluid	no-slip condition
	particles	reflect
bottom wall	particles	escape

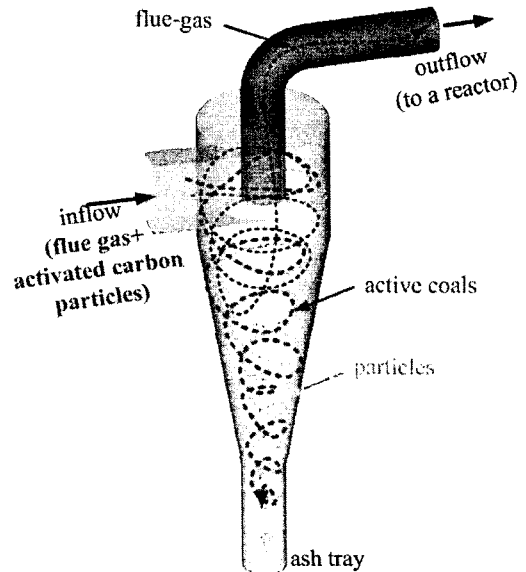


Fig. 2 Flow pattern in cyclone

3. 해석 결과

3.1 연소가스의 유동특성

사이클론 내의 기본적인 유동장을 살펴보기 위하여 활성탄 입자의 유입이 없는 경우에 대한 결과를 검토 한 후, 활성탄 입자가 유입되는 경우의 결과를 살펴보고자 한다.

유입구에서 유입된 연소가스의 궤적을 Fig. 5에 나타내었다. 그림 (a)는 단일 연소가스의 궤적을 나타낸 것이고, 그림 (b)는 다수의 궤적을 나타낸 것이다. 궤적은 유동 속도의 크기에 따라 색상화하여 나타내었다. 유입된 연소가스는 사이클론 내로 유입된 후 사이클론의 형상적 특성에 의하여 그림과 같이 사이클론 내에서 회전유동을 하면서 하부로 이동한다. 유입된 연소가스는 사이클론의 바닥까지 이르지 않고, 사이클론의 중간정도의 위치까지 회전하면서 하부로 이동 후에는 다시 상부에 설치된 삽입된 출구 덕트 쪽을 향하여 흐름의 방향을 변경하는 것을 볼 수 있다.

사이클론 내에서의 연소가스의 국부적인 유동을 확인하기 위하여 Fig. 6에 두 수평단면에서의 속도 벡터를 나타내었다. 사이클론 내로 유입된 연소가스는 유입된 후 원심력에 의하여 외측을 따라 주로 유동함으로써 외측부의 유동이 활발함을 볼 수가 있다. 유입구에서 유입된 후 하부로 내려갈수록 전체적으로 유동은 약화된다. 아래 단면에서 속도벡터를 보면 외측부에서는 하부로의 유동이 존재함을 볼 수 있으며 내측에서는 외측을 통하여 하부로 이동한 연소가스가 다시 상부로 이동하고 있는 것을 볼 수가 있다. 따라서 하부로의 이동은 주로 외측을 통하여 이루어지고 상부로의 이동은 중심부를 통하여 이루어지는 것을 확인할 수가 있다.

해석결과, 사이클론에서 입구와 출구에서의 정압의 차이는 약180Pa정도로 평가되었다. 사이클론 내에서의 압력변화를 보기 위하여 Fig. 7에 사이클론의 내벽과 내부에서의 압력분포를 나타내었다. 그림 (a)를 보면 유입구측 내벽의 압력이 높으며 출구 쪽으로 갈수록 압력이 감소하는 것을 볼 수 있으며 아래의 하부측의 압력은 중간정도의 압력을 보였다. 그림 (b)의 내부의 압력변화를 보면 사이클론 내부의 압력분포가 외측의 압력이 내측의 압력에 비하여 상대적으로 높은 것을 볼 수 있는데 이는 시스템 내에서 회전 유동이 발생하여 내측보다는 외측을 따라 흐르는 유동이 강하기 때문이다.

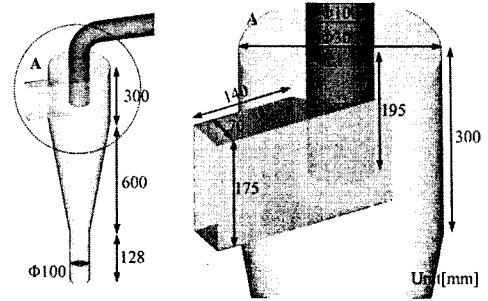


Fig. 3 3D geometry of cyclone

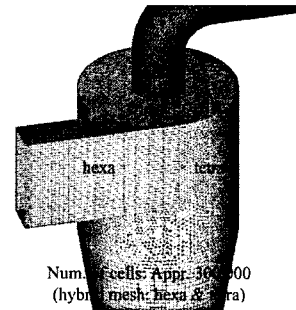


Fig. 4 3D mesh system of cyclone

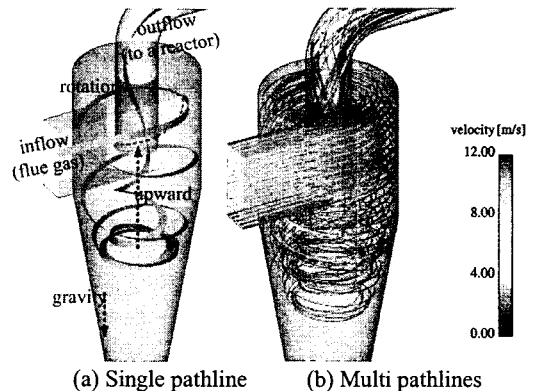


Fig. 5 Pathlines of flue gas in cyclone (colored by velocity magnitude)

사이클론 내로 유입된 연소가스의 시간에 따른 거동을 살펴보기 위하여 Fig. 8에 유입된 연소가스의 단일 및 다수의 궤적을 유동 속도의 크기에 따라 색상화하여 나타내었다. 그림 (a)는 단일 궤적을 나타낸 것이고 그림 (b)는 다수의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 (b)의 출구 부분을 보면 사이클론을 빠져나가는 궤적의 시간이 매우 다양한 것을 볼 수 있다. 이는 사이클론으로 유입되는 연소가스의 유입위치와 이에 따른 사이클론 내에서의 유동 경로가 매우 다양하기 때문이다.

사이클론 내에서 연소가스의 체류시간을 Fig. 9

에 나타내었다. 유입된 연소가스의 사이클론에 체류하는 비율을 보면, 0.5초에서 1.0초 동안 체류하는 비율이 3%, 1.5초에서 2.0초 동안 체류하는 비율이 82%, 2.0초에서 2.5 초 동안 체류하는 비율이 8%, 5초 이상을 체류하는 비율이 6%로 나타났다. 사이클론 내로 유입된 연소가스의 대부분은 1.5초에서 2.0초 동안만 사이클론 내에 체류하는 것으로 계산되었다.

3.2 활성탄 입자의 유동특성

사이클론 내로 활성탄이 유입되는 case 2~4의 경우에 대한 활성탄 입자의 거동을 살펴보고자 한다. 각각의 경우에 유입되는 활성탄 입자의 직경은 각각 $43\ \mu\text{m}$, $49\ \mu\text{m}$, $74\ \mu\text{m}$ 이다.

해석결과를 확인 해본 결과, 활성탄 입자가 유입되지 않는 Case 1의 경우와 활성탄 입자가 유입되는 case 2~4의 경우에 연소가스의 기본적인 거동에서는 거의 차이가 발생하지 않았다. 그래서 여기에서는 case 3 ($49\ \mu\text{m}$)에 대하여 분사된 활성탄 입자의 농도와 입자의 궤적을 그림으로 나타내고 설명한 후에 활성탄 입자의 크기에 따른 사이클론 내의 체류시간을 정리하였다.

사이클론 내에서의 활성탄 입자의 농도 분포를 Fig. 10에 나타내었다. 사이클론의 형상적 특성에 의하여 원심력에 의하여 외측을 따라 주유동이 발생함과 더불어 활성탄 입자의 밀도가 연소가스에 비하여 상당히 크에 따라 활성탄 입자에 작용하는 원심력이 상대적으로 크기 때문에 외측으로의 활성탄 입자의 집중이 발생한 것으로 보인다.

사이클론 내에서의 활성탄의 농도변화를 관찰하기 위하여 연소가스의 궤적을 활성탄의 농도값에 따라 색상화하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10에서 이미 관찰한 바와 같이, 활성탄의 고농도 영역이 외측부에서 발생하는 것을 다시 확인할 수 있다. 중심부 및 하부에서는 활성탄의 농도가 극히 작게 나타났다.

사이클론 내에 유입된 활성탄입자의 거동을 Fig. 12에 나타내었다. 그림 (a)는 단일 활성탄 입자의 궤적을 나타낸 것이고, 그림 (b)는 다수의 활성탄 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 유입구를 통하여 유입된 연소가스는 초기에는 연소가스의 주

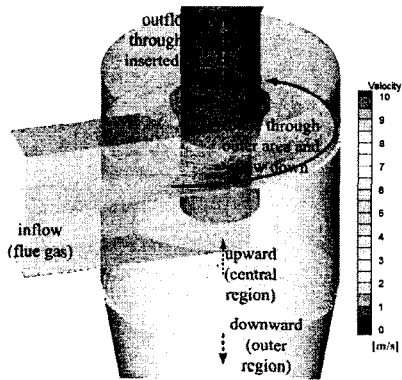


Fig. 6 Velocity vectors on cross sections

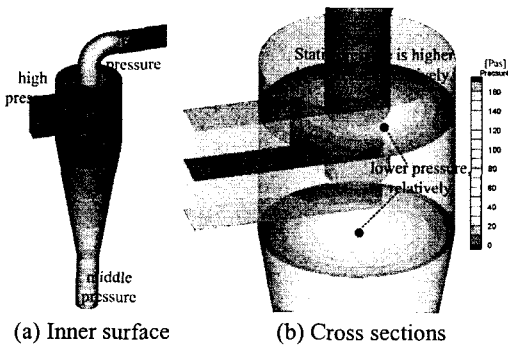


Fig. 7 Pressure distribution

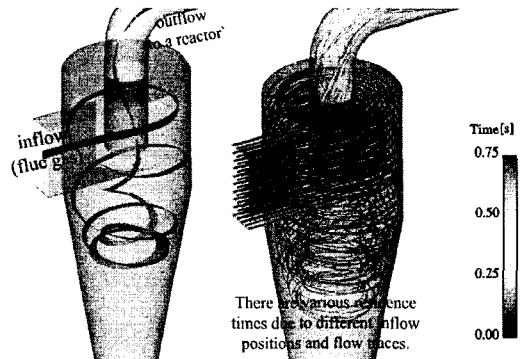


Fig. 8 Pathlines of flue gas in cyclone (colored by residence time)

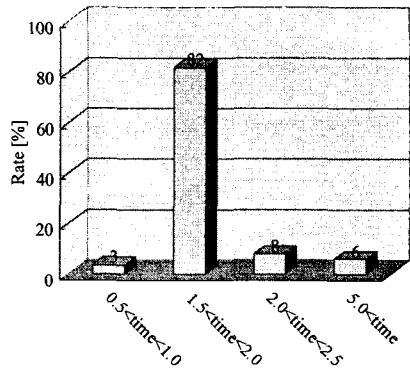


Fig. 9 Residence time of flue gas

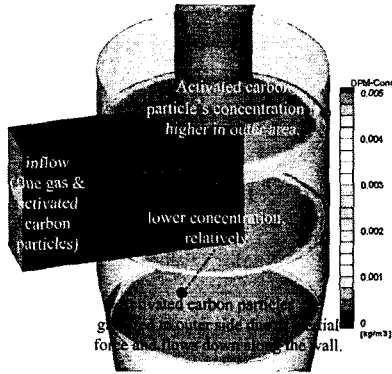


Fig. 10 Distribution of activated carbon

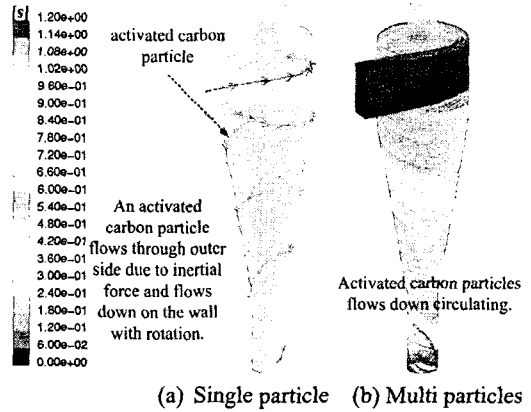
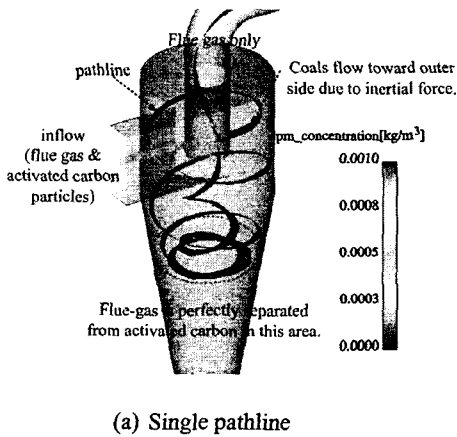


Fig. 12 Pathlines of activated carbon particles (colored by residence time)



(a) Single pathline

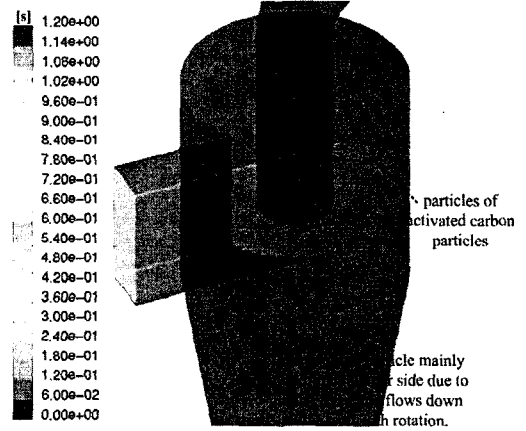
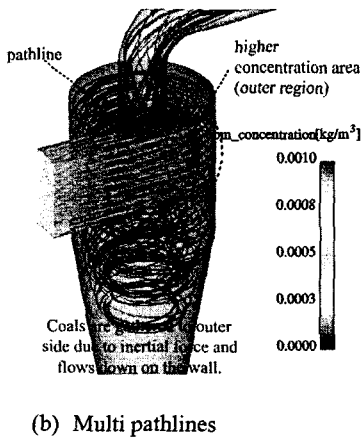


Fig. 13 Snapshot of activated carbon particles (colored by residence time)



(b) Multi pathlines

Fig. 11 Pathlines of flue gas in cyclone (colored by residence time)

Table 2 Residence time of activated carbon particles

	Par. Dia. 43 μm	Par. Dia. 49 μm	Par. Dia. 74 μm
1.0<t<1.1	5.7	3.5	5.4
1.1<t<1.2	26.1	19.1	28.1
1.2<t<1.3	29.0	35.1	33.5
1.3<t<1.4	23.1	25.5	19.7
1.4<t<1.5	9.0	9.7	8.0
1.5<t<1.6	4.2	4.8	4.3
1.6<t<1.7	1.4	1.5	0.9
1.7<t<1.8	1.2	0.5	0.2
1.8<t<1.9	0.2	0.3	0.0
1.9<t	0.2	0.0	0.0

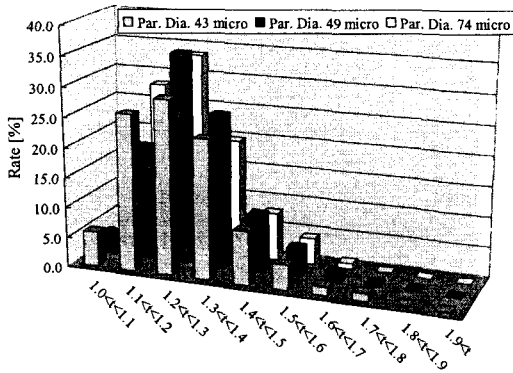


Fig. 14 Residence time of activated carbon particles

흐름에 따라 회전하면서 하부로 이동하나 시간이 지나면서 중력에 의한 영향이 상대적으로 증가함에 따라 연소가스와 분리되어 하부로 이동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 13을 보면 하부로 이동하는 활성탄입자는 사이클론의 외측부를 따라 주로 회전하면서 하부로 이동하는 것을 볼 수 있다. 유입된 활성탄입자는 바닥면에 이르러 사이클론을 빠져나가기까지 대략 6회 정도의 회전유동을 하는 것으로 보여 진다. 유입된 위치와 이동 경로에 따라 활성탄 입자의 궤적과 사이클론 내 체류 시간이 다양한 것을 확인 할 수가 있다.

활성탄 입자의 직경에 따른 사이클론 내에서의 체류 시간을 Table 2에 표로 정리하였으며 Fig. 14에 그래프로 나타내었다. 43 μm 의 입자의 경우 평균 체류시간은 1.279초이고 표준편차는 0.135이었으며, 49 μm 의 입자의 경우에는 평균 체류시간은 1.293초이고 표준편차는 0.125이었다. 74 μm 의 입자의 경우에는 평균 체류시간은 1.265초이고 표준편차는 0.120이었다. 상당수의 활성탄 입자가 사이클론 내에서 1.1초에서 1.4초 정도만 사이클론 내에 체류하는 것으로 계산되었다.

현재의 계산 결과로는 출구에서 활성탄 입자가 검출되지 않았다. 상기의 결과를 종합적으로 보면 현재의 사이클론의 형상과 계산된 유동 조건에서는 사이클론 내에서 활성탄입자와 연소가스가 매우 잘 분리 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 연소가스와 함께 유입된 활성탄입자는 사이클론에서 효과적으로 제거가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

효율적인 분무흡착공정의 개발을 위해서는 흡착/축매 장치의 공정 설계가 매우 중요하다. 백필터

전단에 활성탄을 분무하게 되면 NOx 및 다이옥신이 활성탄이 흡착될 수 있는 시간이 매우 짧기 때문에 충분한 흡착반응이 발생하도록 반응시간을 최적화하는 것이 처리효율 향상에 매우 중요하기 때문이다. 하여 반응기에 연소가스가 주입되기 전에 사이클론에서도 활성탄을 주입하여 사전반응이 이루어지는 공정을 추가로 시도하고 있다.

이에 본 연구에서는 전산유체기법(CFD)을 활용하여 사이클론에 활성탄이 주입된 경우에 사이클론 내에서 연소가스와 활성탄 입자의 유동 특성을 해석하였다. 또한 사이클론 내 연소가스의 체류시간을 계산하였다.

유입된 연소가스의 사이클론에 체류하는 비율을 보면, 0.5초에서 1.0초 동안 체류하는 비율이 3%, 1.5초에서 2.0초 동안 체류하는 비율이 82%, 2.0초에서 2.5 초 동안 체류하는 비율이 8%, 5초 이상을 체류하는 비율이 6%로 나타났다. 사이클론 내로 유입된 연소가스의 대부분은 1.5초에서 2.0초 동안만 사이클론 내에 체류하는 것으로 계산되었다.

활성탄 입자의 체류시간을 보면, 43 μm 의 입자의 경우 평균 체류시간은 1.279초이고 표준편차는 0.135이었으며, 49 μm 의 입자의 경우에는 평균 체류시간은 1.293초이고 표준편차는 0.125이었다. 74 μm 의 입자의 경우에는 평균 체류시간은 1.265초이고 표준편차는 0.120이었다. 상당수의 활성탄 입자가 사이클론 내에서 1.1초에서 1.4초 정도만 사이클론 내에 체류하는 것으로 계산되었다.

결과를 종합적으로 보면 현재의 사이클론의 형상과 계산된 유동 조건에서는 사이클론 내에서 활성탄입자와 연소가스가 매우 잘 분리 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 연소가스와 함께 유입된 활성탄입자는 사이클론에서 효과적으로 제거가 가능할 것으로 판단된다. 산정된 연소가스 및 활성탄 입자의 체류시간을 바탕으로 활성탄의 반응식과 적절히 조합한다면 좀 더 정확한 제거 효율을 산정하는 데 매우 효과적일 것이며 이를 바탕으로 전체 시스템의 최적 설계에 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 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.

- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Hinze, J.O., 1975, "Turbulence", McGraw-Hill Publishing Co., New York.
- (5) Haider and Levenspiel, O., 1989, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technology*, Vol. 58, pp. 63 ~ 70.
- (6) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, D.C.