

백필터를 활용한 흡착/촉매 통합공정 시스템의 반응기 내 유동특성 및 체류시간에 대한 수치해석적 연구

Numerical Analysis on Flow Characteristics in the Reactor of an Integrated Adsorption/Catalysis Process with Bag Filters

최 청 렬* · 구 윤 서¹⁾

에니텍(주), ¹⁾안양대학교 환경공학과
(2006년 11월 1일 접수, 2007년 2월 13일 채택)

Choeng Ryul Choi* and Yoon Seo Koo¹⁾

ENITECH, ¹⁾Department of Environmental Engineering, Anyang University

(Received 1 November 2006, accepted 13 February 2007)

Abstract

Numerical analysis has been performed to understand flow characteristics in the reactor with bag filters in an integrated adsorption/catalytic process which can treat dioxin and NO_x together. Computational fluid dynamics technique was employed with Euler-Lagrangian model to consider flue gas and activated carbon particles simultaneously, so that residence time of flue gas and activated carbon particle 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. 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 results obtained would be effectively used to estimate the removal efficiency in the reactor once the residence time is combined with the reaction equation.

Key words : Adsorption/Catalytic process, Bag filter, Activated carbon, Flue gas, Residence time

1. 서 론

기존에 우리나라의 폐기물 처리 정책은 매립위주

였으나, 현재는 소각처리의 비율이 점차 증가되는 실정이고, 소각시설 인근 지역의 대기환경과 관련된 문제점 및 그로 인한 주민민원의 발생이 증가하는 추세에 있다. 특히 산업 폐기물을 처리하는 폐기물 소각장에서 발생하는 다이옥신, NO_x, 악취성 물질 등의 처리는 시급한 과제 중 하나이다. 그리하여 공정상

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-476-0901, E-mail : choicr@empal.com

또는 소각시설에서 배출되는 연소가스 및 폐 분진을 처리하는 기술개발을 위한 연구가 많이 수행되어 왔다(박병현과 조영민, 2004; 이상권 등, 1997).

산성가스를 제거하기 위하여 건조분말 상태의 흡착제를 직접 반응기에 주입하여 가스상의 오염물질을 제거하고, 후단에 전기 집진기나 백필터를 설치하여 입자상의 오염물질을 제거하는 건식세정 시스템이 최근에도 도입되고 있다. 그러나, 기존의 단일 설비나 기술로는 발전소, 소각시설 및 화학 산업공정 등에서 다량으로 발생하는 대기오염물질을 강화된 규제에 맞추어 효과적으로 제거하는 데에 어려움이 있다. 따라서 현재는 백필터를 이용하여 SO_x , NO_x , HCl, HF 등의 산성가스와 폐 분진을 동시에 제거하는데 최종 목적을 두고 있다(윤성환과 이상권, 2004; 이상권 등, 1997).

본 연구에서는 이러한 노력의 일환으로, 기존의 백필터 시스템이 다이옥신 제거용인 반면에 다이옥신과 NO_x 를 동시에 제거할 수 있는 흡착/촉매 통합공정 시스템을 개발 중이다. 일반적으로 활성탄을 이용한 배출가스 처리용 공정으로는 크게 백필터 입구에 PAC (Particulate Activated Carbon)를 주입하는 분무 흡착 방식과 GAC (Granular Activated Carbon)를 이용한 고정층 흡착방식으로 구분할 수 있다. 두 공정의 특징은 소각시설 배출가스 내의 다이옥신을 제거하기 위한 공정으로, 주로 PAC를 이용하여 백필터 전단에 주입하는 분무흡착공정이 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 질소산화물은 산화 및 흡착에 소요되는 시간이 길어 고정층 반응기가 주로 사용된다. 그러나 고정층 반응기의 경우 설치 운영비용이 높고, 화재 위험이 높으며 아울러 편류흐름(channeling)의 발생으로 인하여 운전이 어려워 이를 동시에 처리할 수 있는 분무 흡착공정의 개발이 될 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 높이고, 질소산화물과 다이옥신풀

를 높은 효율로 동시처리 가능한 흡착/촉매 이중 백필터 공정을 실공정으로 개발하기 위해서 다이옥신과 NO_x 를 동시처리 가능한 특수 활성탄 개발과 아울러 이를 적용할 수 있는 효율적인 분무흡착 공정 개발이 병행되어야 한다.

반응기 전단에 활성탄을 분무하게 되면 NO_x 및 다이옥신이 활성탄에 흡착될 수 있는 시간이 매우 짧기 때문에 충분한 흡착반응이 발생하도록 반응시간을 최적화하는 것이 처리효율 향상에 매우 중요하다.

현재 고려 중인 반응기에서 연소가스는 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 연소가스는 백필터에 의하여 활성탄과 분리되기 전까지 계속 흡착 반응이 이루어진다. 활성탄과 혼합된 연소가스는 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(그림 1).

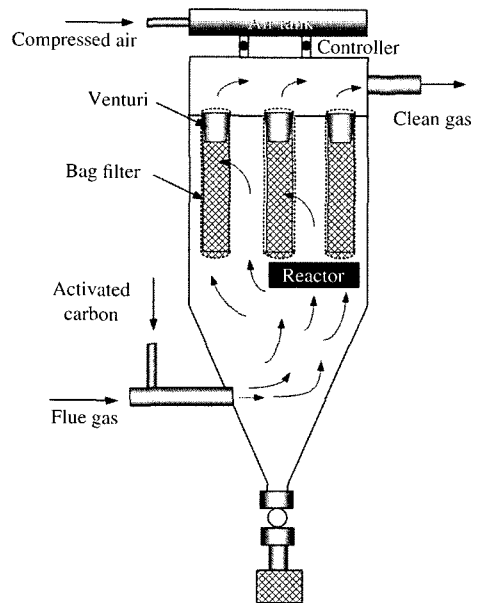


Fig. 1. Schematic diagram of an adsorptive/catalytic process for simultaneous removal of NO_x and dioxides.

이에 본 연구에서는 질소산화물과 다이옥신을 동시에 처리할 수 있는 흡착/축매 반응기에서 흡착효율을 극대화 시킬 수 있는 반응기의 최적설계와 운전조건을 파악하기 위하여 전산유체기법(CFD)을 활용하여 반응기에 활성탄이 주입된 경우에 반응기 내에서 연소가스와 활성탄 입자의 유동 특성을 해석하였고, 연소가스와 활성탄 입자의 체류시간을 계산하였다.

2. 해석 방법

2.1 수학적 모델링

흡착/축매 반응기 내에서의 연소가스의 유동해석을 위해서 반응기 내 유동을 3차원 정상상태의 유동으로 가정하여 계산을 수행하였다. 이를 위하여 연속방정식, 운동량방정식을 사용하였으며 난류의 영향을 고려하기 위하여 standard k-ε 난류모델을 적용하였다.

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

계산 순서에 있어서 연소가스의 유동장을 먼저 계산하고 입자의 거동을 계산하는 one-way interaction의 경우에는, 본 연구에서와 같이 유체와 입자간의 밀도차이가 큰 경우에는 부정확하므로, 본 연구에서는 연소가스의 유동장과 활성탄 입자의 해석을 동시에 계산(two-way interaction)하여 상호작용을 고려할 수 있게 하였다.

백필터를 통한 압력강하를 모사하기 위하여 다공성 매질 모델(porous media model)을 사용하여 이를 통한 압력강하를 고려하였다.

연속방정식과 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 다음과 같다(Choi and Kim, 1999).

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \end{aligned}$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + S_i \quad (2)$$

위 식(2)의 Reynolds 응력은 근사적으로 모사하였으며, Boussinesq 가설(Hinze, 1975)의 Reynolds 응력은 다음과 같다.

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

난류운동에너지 k와 난류소산율 ε은 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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

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 k과 ε에 대한 난류 Prandtl 수를 나타낸다.

난류점성계수, μ_t 는 k와 ε으로부터 계산된다.

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

그 외의 모델 상수는 다음과 같다.

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

2.1.1 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 저항력으로서 입자의 크기에 따른 항력의 변화를 고려하게 되고, F_x 는 입자 주변의 특수한 유동조건 및 해석조건들(Virtual Mass, Forces in Rotating Reference Frames, Thermophoretic Force, Brownian Force, Saffman's Lift Force 등)을 반영하게 된다(FLUENT 6.1, Documentation, 21.2.1 참조)

조). 현재의 계산에서 $F_x=0$ 이다.

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

여기서, u 는 유체의 속도, u_p 는 입자속도, μ 는 유체의 분자점성계수, ρ 는 유체 밀도, ρ_p 는 입자밀도, 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,

$$\begin{aligned} b_1 &= \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \\ b_2 &= 0.0964 - 0.5565\phi \\ b_3 &= \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \\ b_4 &= \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \end{aligned} \quad (12)$$

의 Haider and Levenspiel (1989) 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.

2. 1. 2 다공성 매질 모델링

반응기 내 설치된 9개의 백필터에서의 압력강하를 모사하기 위하여 다공성 매질 모델 (porous media model)을 추가적으로 고려하였다. 백필터를 지나는 유동을 해석하기 위해서는 수학적(해석적) 모델링이 요구되는데 수치해석에서는 다공질 판을 앞 절에 나타낸 운동량 방정식 식(2)에서 생성항으로 처리하여 해석을 수행한다. 물리적 상황에서 나타나는 이 다공질판의 blockage 효과는 수치해석에서는 나타나지 않는다. 단지 다공질판을 지나는 속도벡터의 연속성을 유지하고자 체적유량에 기초하여 다공질 판에서의 가상 속도를 사용한다. 결과적으로 다공질 판에서의 압력강하만을 고려한다. 현재의 해석에서는 백필터 내에서의 유동특성을 고려하여 반경방향으로 주

압력강하가 유발되도록 설정하였다.

다공성 매질은 운동량 방정식의 운동량 생성항으로 모델링되며 두 개의 항으로 구성된다. 첫 번째 항은 마찰손실 항이고 두 번째 항은 운동에너지 손실이다.

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (14)$$

S_i 는 운동량 방정식의 생성항이다. 이 운동량 sink는 porous 영역에서 압력구배에 기여하게 된다. 이 식은 간략히 다음과 같이 표현된다.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v_i| v_i \right) \quad (15)$$

여기서 α 는 permeability이고, C_2 는 inertial resistance factor이다.

압력손실계수 (pressure loss coefficient)가 알려진 경우 다음과 같이 C_2 를 계산할 수 있다.

$$C_2 = \frac{K}{t_{thickness}} \left(\frac{V_{flow}}{V_{100\%}} \right)^2 = \frac{K}{t_{thickness}} \left(\frac{A_{100\%, porous}}{A_{porous}} \right)^2 \quad (16)$$

여기서 K =reference pressure loss coefficient

$t_{thickness}$ =thickness of porous media

$A_{100\%, porous}$ =100% open area of porous media

A_{porous} =flow area of porous media

해를 구하기 위하여 First-order upwind scheme과 staggered grid system을 적용하였다. 압력-속도해는 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations, Patankar, 1980)을 이용하여 구하였으며, 벽면에서는 점착(no-slip) 조건을 적용하여 정상해를 구하였다. 활성탄 입자가 벽면에 부딪히는 경우에, 충돌 후 활성탄이 입사각과 동일한 각으로 반사되도록 설정하였다. 유동해석에 사용된 코드는 범용 CFD 코드인 FLUENT 6.1을 사용하였다.

2. 2 해석모델 및 계산조건

흡착/축매 반응기의 흡착/축매 반응기의 기본적인 3차원 형상과 유동 양식을 그림 2에 나타내었다. 연소가스는 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 연소가스는

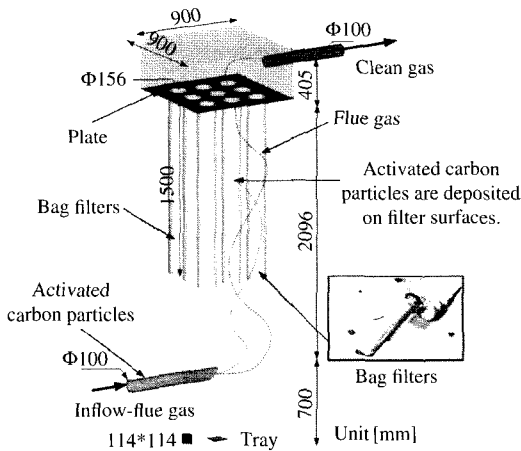


Fig. 2. Flow pattern in the reactor and dimensions.

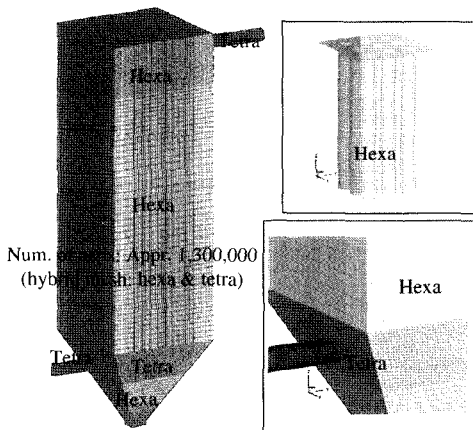


Fig. 3. 3D mesh system of the reactor.

백필터에 의하여 활성탄과 분리되기 전까지 계속 흡착 반응이 이루어진다. 활성탄과 혼합된 연소가스는 반응기 내에 설치된 9개의 백필터에 의하여 활성탄과 분리된다.

흡착/축매 반응기 내에서의 유동해석을 위하여 전문적인 수치해석 기법을 사용하여 전산유체해석 프로그램 사용하여 해석을 수행하였다. 먼저 기본 설계 도면을 바탕으로 3차원 형상을 제작하고 격자 시스템을 구성하였다(그림 3). 벽면에서의 격자의 조밀성은 난류효과에 의한 벽면에서의 점성유동에 큰 영향을 미치고 본 연구에서와 같이 입자와 벽면과의 충돌이 있는 경우에 그 영향은 현저하다. 따라서 본 해석

에서는 벽면 부근에서의 난류 영향과 입자거동을 정확히 해석하고자 벽면에 상당히 조밀한 격자를 구성하였고, 격자의 조밀함에 따른 사전해석을 통하여 최종격자 시스템을 구성하였다. 반응기의 유동 해석을 위하여 소요된 격자는 약 130만 셀이며 hexa와 tetra 격자를 혼용한 hybrid 격자 시스템을 구성하였다.

이 후 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 $43, 49, 74 \mu\text{m}$ 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 ($43 \sim 74 \mu\text{m}$), 점화온도는 260°C 이다.

백필터에 의해 유발되는 압력강하는 반응기 내의 압력강하가 $1,500 \text{ Pas}$ 정도라는 사전실험으로부터 얻어진 압력강하 값을 활용하였다. 이 압력강하 값을 수치해석 시에 다공성 매질로 처리된 백필터에 적용하여 압력강하 특성 값을 산정하고 이를 활용하여 해석을 수행하였다. 주 압력강하가 백필터에서 반경 방향으로 발생하기 때문에 반경 방향으로 주 압력강하가 발생하도록 하였다.

활성탄 입자의 백필터에의 포집은 활성탄 입자가 백필터 내로 유입되는 경우에 포집이 되는 것으로 모델링을 하였다. 현재의 해석 조건에서는 각각의 해석 경우에 활성탄 입자의 직경이 동일하기 때문에 입자의 직경에 따른 선택적인 포집이 필요하지 않았다.

3. 해석 결과

3.1 연소가스의 유동특성

해석 결과, 활성탄 입자의 크기에 따라 유동양식은 큰 변화가 없는 것으로 관찰되었기에 논문에서는 입자크기가 $49 \mu\text{m}$ 인 경우에 해석된 case 3의 해석

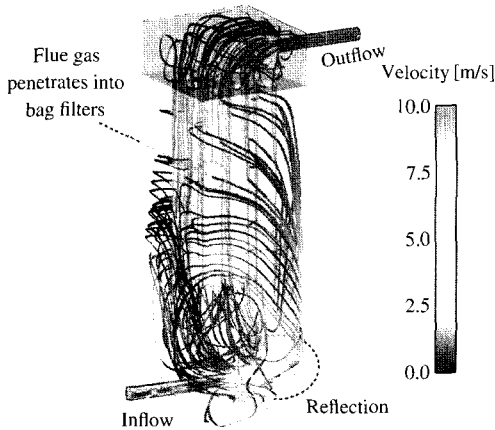


Fig. 4. Pathlines of flue gas in the reactor.

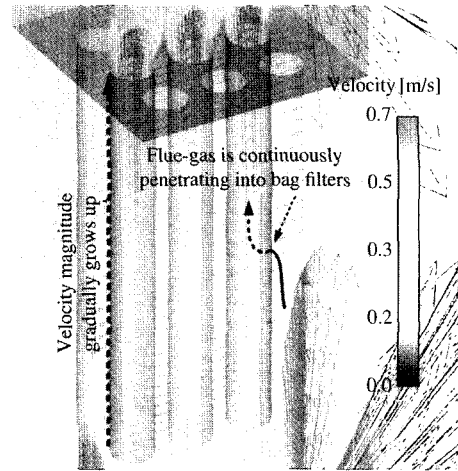


Fig. 6. Velocity vectors of flue gas in bag filters.

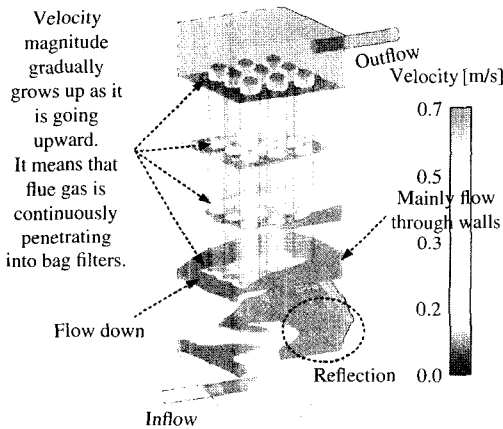


Fig. 5. Velocity vectors of flue gas in the reactor.

결과를 주로 다룬 후에 활성탄 입자의 크기에 따른 영향을 평가하였다.

3. 1. 1 연소가스 유동장

해석으로부터 얻어진 유입된 연소가스의 케적을 그림 4에 나타내었다. 유입구를 통하여 유입된 연소가스는 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.

반응기의 수평 단면에서의 속도 벡터를 그림 5에 나타내었다. 유입구의 반대측 벽에 부딪힌 연소가스의 유동형태를 명확히 확인할 수 있으며, 주유동이 벽을 따라 상부로 이동하는 것을 볼 수가 있다. 반응기 내에서 상부로 갈수록 유동은 약화가 되지만 백필터 내부의 유동은 상부로 갈수록 강화가 되는 것을 볼 수가 있다. 백필터의 하부에서의 유동장이 다소 복잡한 양식을 나타내는 것도 볼 수가 있다. 그리고 백필터가 설치된 부분의 반응기에서는 유동이 다소 안정적으로 유지되는 것을 볼 수가 있다. 이는 백필터를 통하여 연소가스가 지속적으로 유입되기 때문이다.

백필터 내부의 속도분포를 그림 6에 나타내었다. 필터내부에서 상부로 올라 갈수록 유동량이 증가하는 것을 볼 수가 있으며, 백필터에 수직인 방향으로 연소가스가 지속적으로 유입되는 것을 볼 수가 있다. 백필터 면을 통하여 유입되는 연소가스의 유입속도는 약간의 차이가 있으나 거의 동일한 속도로 유입되었다. 본 해석에 앞서서 다양한 압력강하를 가지는 백필터의 조건에 대하여 사전 해석을 수행한 결과, 백필터를 통한 압력강하가 작은 경우에는 백필터로 유입되는 연소가스의 투과속도가 필터 전면에 따라 다른 분포를 나타냈었다. 하지만 현재의 백필터의 압력강하 조건 1,500 pas에서는 압력강하가 크기 때문에 필터 전면에 균일한 투과속도를 보였다. 따라서 백필터의 선정이 반응기 내의 유동특성에 큰 영향을

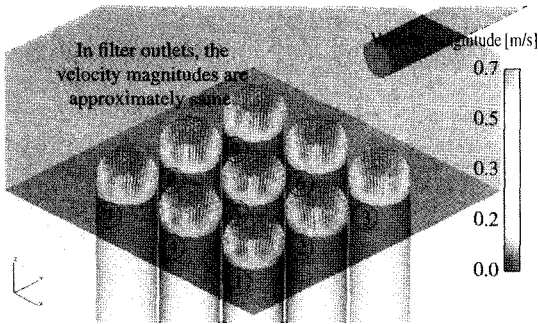


Fig. 7. Velocity vectors of flue gas on the top of the bag filters.

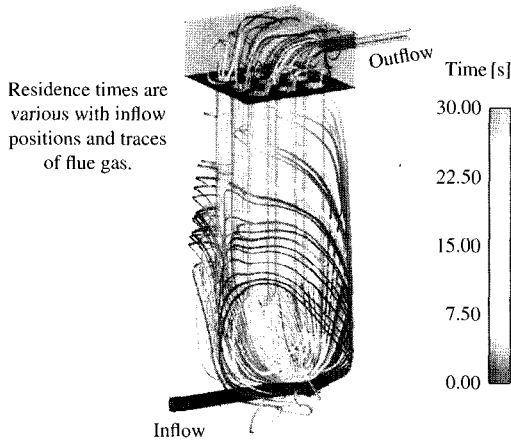


Fig. 8. Residence time of the activated carbon particles in the reactor.

미친다는 것을 알 수 있었다.

필터의 출구에서의 속도분포를 그림 7에 나타내었다. 거의 유사한 분포형태와 크기를 보여주었다. 다소간의 차이는 있으나 각각의 필터를 통하여 배출되는 연소가스의 유량은 거의 동일함을 확인할 수가 있다.

3. 1. 2 연소가스 체류시간

반응기 내 연소가스의 체류시간을 평가하기 위하여 그림 8에 연소가스의 궤적을 체류시간에 따라 색 상화하여 나타내었다. 앞서 살펴본 바와 같이, 하부에 설치된 연소가스의 유입구를 통하여 유입된 연소가스가 반응기 내에서 이동하는 경로가 매우 다양하므로 반응기 내에서 체류하는 시간 또한 매우 다양하

Table 1. Residence time of flue gas.

Time [s]	Ratio [%]	Time [s]	Ratio [%]
5 < t < 10	9.3	30 < t < 35	3.9
10 < t < 15	22.7	35 < t < 40	2.6
15 < t < 20	15.8	40 < t < 45	1.9
20 < t < 25	11.4	45 < t < 50	0.9
25 < t < 30	11.9	50 < t	19.6
Average [s]	15.6	Standard deviation	18.6

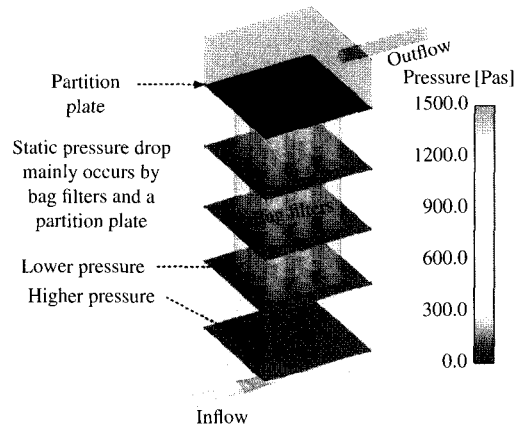
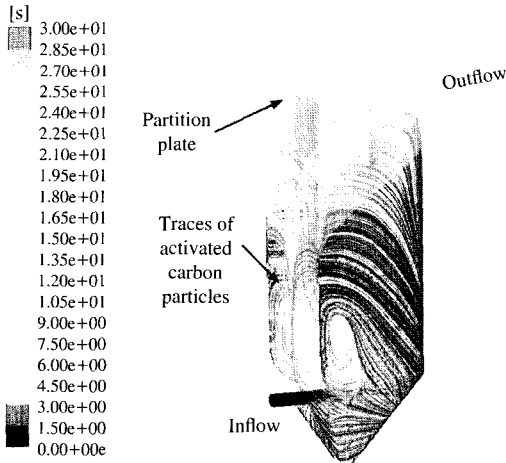


Fig. 9. Pressure distribution in the reactor.

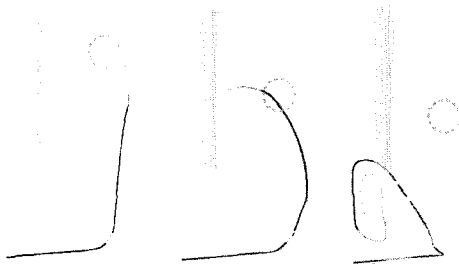
게 나타났다. 유입된 연소가스의 일부는 매우 복잡한 경로를 따라 반응기 내를 흐름으로 인해서 상당히 긴 체류 시간을 가지는 경우도 있었다. 유입된 연소가스의 반응기 내 체류 시간을 표 1에 정리하여 나타내었다. 이를 보면 유입된 연소가스의 23%가 10초에서 15초 동안 반응기 내에 체류하며, 71% 정도가 30초 내에 반응기를 빠져나가는 것으로 평가되었다. 평균적으로는 15.6초 정도 연소가스가 반응기 내에 체류하는 것으로 평가되었다. 50초 이상 반응기 내 체류(순환)하는 연소가스가 19.6%로 상당히 많은 연소가스가 반응기 내를 순환하는 것으로 해석되었다. 이는 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 일부 연소가스들은 상당히 복잡한 경로를 긴 시간 동안 이동하기 때문으로 보여진다. 연소가스의 반응기 내 체류시간의 표준편차를 보면 18.6으로써 체류시간의 분포가 매우 분산적임을 볼 수 있다.

3. 1. 3 압력분포

반응기 내의 압력변화를 보기 위하여 그림 9에 반



(a) Multi particles of activated carbon



(b) Single particle of activated carbon

Fig. 10. Traces of activated carbon particles in the reactor.

응기 내에서의 압력을 나타내었다. 반응기 내의 압력 변화는 크게 백필터의 전단과 후단으로 크게 나누어 지는 것을 볼 수가 있다. 주 압력강하는 백필터에 의하여 발생한다는 것을 알 수가 있다.

반응기 내 유동 속도값이 그다지 크지 않으므로 동압의 크기는 정압에 비하여 상대적으로 매우 작기 때문에 동압의 불균일한 분포가 전체 압력분포에 미치는 영향은 매우 적었다. 반응기 내 전체 압력강하는 1,496 Pas 정도로 평가되었다. 백필터의 표면에 작용하는 압력의 분포는 거의 동일한 것으로 관찰되었기 때문에 백필터에 작용하는 힘 또한 거의 균일하게 분포할 것을 예상할 수 있다.

Table 2. Residence time of activated carbon particles.

Time [s]	Ratio [%]	Time [s]	Ratio [%]
2 < t < 4	0.0	18 < t < 20	5.2
4 < t < 6	0.0	20 < t < 22	5.7
6 < t < 8	0.0	22 < t < 24	6.3
8 < t < 10	3.8	24 < t < 26	10.3
10 < t < 12	12.5	26 < t < 28	3.5
12 < t < 14	15.8	28 < t < 30	3.5
14 < t < 16	11.1	30 < t	12.2
16 < t < 18	10.1		
Average [s]	15.3	Standard deviation	8.6

3. 1. 4 활성탄 궤적 및 체류시간

활성탄 입자의 궤적을 그림 10에 나타내었다. 유입된 활성탄 입자는 연소가스의 유동이 강한 하부영역에서는 연소가스의 궤적과 거의 유사하게 이동하지만 유동이 약한 영역에 이르러서는 입자들의 질량이 연소가스에 비하여 상당히 무겁고 항력이 크기 때문에 연소가스와는 다른 이동 경로를 가지는 것을 볼 수가 있다. 만약 밀도가 유체와 동일하고 입경이 아주 작다면 유체와 동일 경로로 이동할 것이다. 반응기 내를 이동하던 활성탄 입자는 설치된 백필터의 표면에 흡착되는 것을 볼 수가 있다. 이를 자세히 확인하기 위하여 그림 10(b)에 단일 입자의 궤적을 나타내었다. 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 흡착되기도 하는 것을 볼 수가 있다. 이에 따라 활성탄 입자가 반응기 내에 체류하는 체류 시간이 매우 다양하게 되는 것이다.

반응기 내에 주입된 활성탄 입자의 체류시간을 표 2에 나타내었다. 유입된 활성탄 입자의 약 60% 정도가 20초 내에 백필터의 표면에 흡착되는 것으로 계산되었으며 평균적으로는 15.3초 내에 백필터의 표면에 흡착되는 것으로 계산되었다. 반응기 내에서 30초 이상 백필터에 흡착되지 않는 활성탄 입자도 12.2% 정도가 되었다. 이런 입자들은 그림 10에서 보여지는 바와 같이 매우 복잡한 경로를 따라 이동하기 때문에 반응기 내 체류시간이 길어지는 것으로 예상된다. 활성탄 입자의 반응기 내 체류시간의 표준편차가 8.6으로서 흡착되기까지 체류시간이 매우 다양하였다.

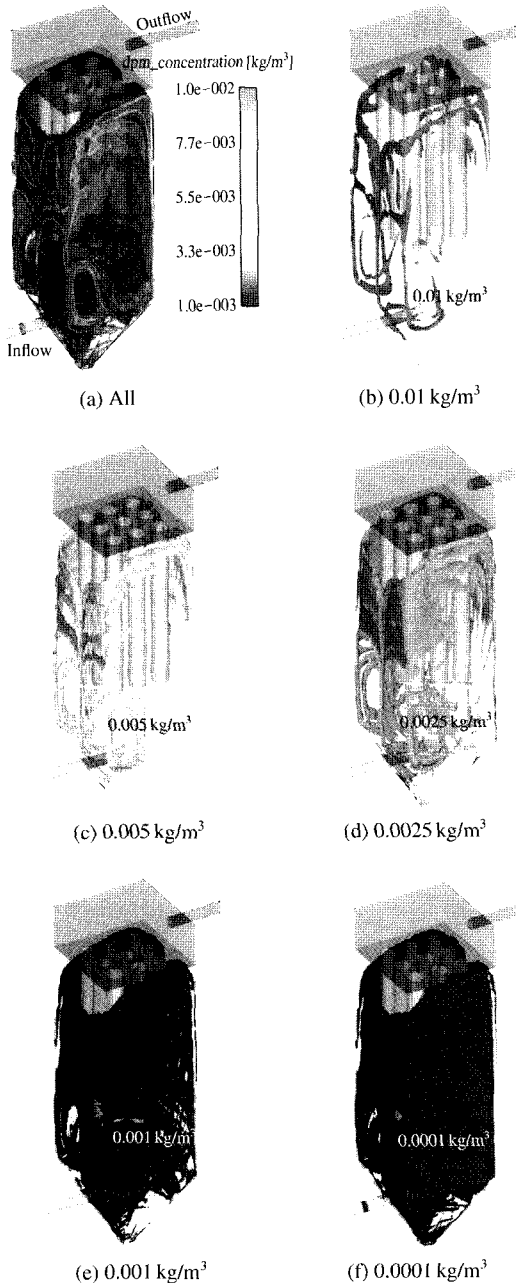


Fig. 11. Iso-surface of activated carbon in the reactor.

3.1.5 활성화탄 분포

반응기 내 활성화탄 농도의 iso-surface를 그림 11에 나타내었다. 반응기 내 고농도 영역과 저농도 영역이 상부 혹은 하부로 구획지어져 있는 것이 아니라 전

Table 3. Residence time of flue-gas with particle's size.

Time [s]	Ratio [%]			
	No carbon	43 μm	49 μm	74 μm
5 < t < 10	11.7	7.1	9.3	8.9
10 < t < 15	21.3	25.7	22.7	28.3
15 < t < 20	17.3	16.9	15.8	15.5
20 < t < 25	14.5	11.7	11.4	11.2
25 < t < 30	6.0	10.1	11.9	8.4
30 < t < 35	6.2	8.4	3.9	3.2
35 < t < 40	2.2	4.1	2.6	2.5
40 < t < 45	1.5	0.9	1.9	0.6
45 < t < 50	1.7	1.2	0.9	1.2
50 < t	17.5	13.8	19.6	20.1
Average [s]	15.8	17.4	15.6	14.6
Standard deviation	17.8	15.8	18.6	18.9

체적으로 고농도 영역과 저농도 영역이 부분적으로 공존하며, 그 영역의 크기만이 부분적으로 차이가 나는 것을 볼 수가 있다. 이 결과를 통하여 활성화탄 입자의 주 체적을 유추할 수가 있다.

고농도 영역과 저농도 영역을 자세히 관찰하기 위하여 그림 11(b-f)에 활성화탄의 농도가 0.01, 0.005, 0.0025, 0.001, 0.0001 kg/m³인 iso-surface를 나타내었다. 상대적으로 고농도 영역의 위치는 활성화탄입자의 체적과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 활성화탄 입자는 연소가스에 비하여 관성력이 크므로 반응기 내에 회전 시 더욱 큰 원심력을 가지므로 주로 벽측을 따라 움직이게 된다. 따라서 현재의 분포를 보면 고농도 영역의 위치가 활성화탄의 주체적과 거의 일치하는 것을 볼 수가 있다.

3.2 활성화탄 입자의 크기에 따른 영향

활성탄 입자의 크기에 따른 영향을 평가하기 위하여 활성화탄이 주입되지 않은 경우와 주입되는 활성화탄 입자의 크기 43, 49, 74 μm에 대하여 해석을 수행하였다.

반응기 내 연소가스의 체류시간을 표 3에 정리하였고 이를 그림 12에 그래프로 나타내었다. 모든 경우에서 체류시간의 분포가 매우 다양하게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이는 반응기 내에서 연소가스의 체적이 매우 다양하다는 것을 의미한다. 연소가스의 반응기 내 체류시간의 표준편차를 보면 15.8~18.9로서 매우 큰 표준편차 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 평균 체류시간은 주입된 활성화탄 입자의 크기가

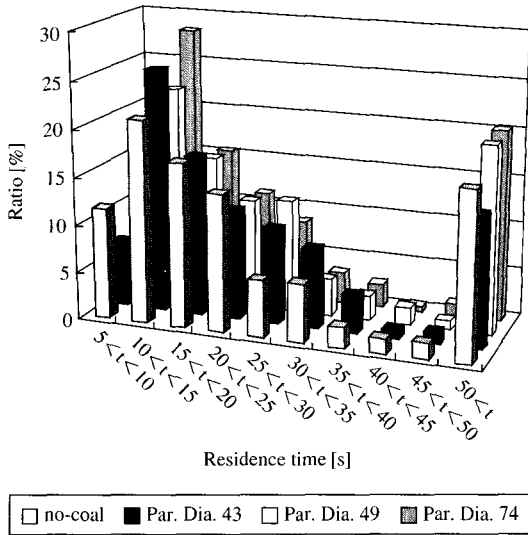


Fig. 12. Residence time of flue-gas with particle's size.

커짐에 따라 다소 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 주입된 활성탄으로 인하여 궤적의 변화가 발생하기 때문으로 판단된다. 평균적으로는 14.6~17.4초 정도의 체류시간을 보여주었다.

반응기 내 유입된 활성탄 입자의 체류시간을 표 4에 정리하였고 이를 그림 13에 그래프로 나타내었다. 각각의 경우에 활성탄 입자의 체류시간 또한 연소가스의 체류시간과 마찬가지로 매우 다양한 분포를 보여준다. 표준편차 또한 6.9~9.6으로 매우 큰 값을 보여줌으로써 체류시간이 상당히 분산적임을 보여주었다. 이는 앞서 확인한 바와 같이 활성탄 입자의 반응기 내 궤적이 매우 다양하기 때문으로 판단된다. 입자의 직경이 증가하는 경우, 접촉면적의 증가로 인하여 항력이 증가하게 되고 단일 입자가 가지는 관성력이 증가함에 따라 반응기 내에서 활성탄 입자의 경로가 바뀌게 되고, 이에 따라 체류시간 또한 변화하게 된다. 평균적으로는 13.5~16.5초 정도의 체류시간을 보여주었으며, 활성탄 입자의 직경이 큰 경우에 체류시간이 다소 감소하는 결과를 보여주었다.

4. 결 론

다이옥신과 NO_x를 동시에 제거할 수 있는 흡착/

Table 4. Residence time of activated carbon particles with particle's size.

Time [s]	Ratio [%]		
	43 μm	49 μm	74 μm
2 < t < 4	0.5	0.0	0.0
4 < t < 6	0.0	0.0	0.0
6 < t < 8	0.0	0.0	0.8
8 < t < 10	2.3	3.8	9.3
10 < t < 12	15.9	12.5	3.9
12 < t < 14	15.9	15.8	20.5
14 < t < 16	7.7	11.1	9.7
16 < t < 18	5.9	10.1	7.3
18 < t < 20	7.4	5.2	7.7
20 < t < 22	14.1	5.7	7.7
22 < t < 24	6.9	6.3	2.7
24 < t < 26	6.9	10.3	3.9
26 < t < 28	4.9	3.5	3.1
28 < t < 30	4.6	3.5	4.6
30 < t	6.9	12.2	18.9
Average [s]	16.5	15.3	13.5
Standard deviation	6.9	8.6	9.6

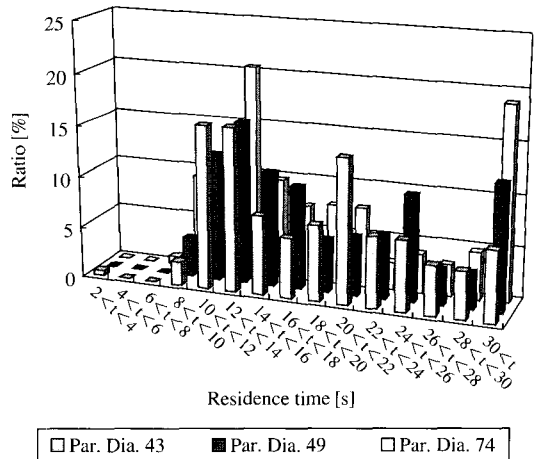


Fig. 13. Residence time of activated carbon particles with particle's size.

촉매 통합공정 시스템의 흡착/촉매 반응기 내에서의 연소가스와 활성탄 입자의 유동 특성을 파악하고, 연소가스와 활성탄 입자의 반응기 내 체류시간을 산정하기 위하여 전산유체기법을 활용하여 해석을 수행하였다. 또한 활성탄 입자의 크기에 따른 영향을 평가하였다.

해석 결과, 유입구의 반대측 벽에 부딪힌 연소가스

의 유동형태를 명확히 확인할 수 있었으며, 주유동이 벽을 따라 상부로 이동하는 것을 볼 수가 있었다. 반응기 내에서 상부로 갈수록 유동은 약화가 되지만 백필터 내부의 유동은 상부로 갈수록 강화가 되었다. 백필터의 하부에서의 유동장이 다소 복잡한 양상을 나타내었다. 하부에 설치된 연소가스의 유입구를 통하여 유입된 연소가스가 반응기 내에서 이동하는 경로가 매우 다양하므로 반응기 내에서 체류하는 시간 또한 매우 다양하게 나타났다. 유입된 연소가스의 일부는 매우 복잡한 경로를 따라 반응기 내를 흐름으로 인해서 상당히 긴 체류시간을 가지는 경우도 있었다. 반응기 내의 압력변화는 크게 백필터의 전단과 후단으로 크게 나누어지는 것을 볼 수가 있다. 주 압력강하는 백필터에 의하여 발생하였다.

유입된 활성탄 입자는 연소가스의 유동이 강한 하부영역에서는 연소가스의 궤적과 거의 유사하게 이동하지만 유동이 약한 영역에 이르러서는 입자들의 질량이 연소가스에 비하여 상당히 무겁기 때문에 관성력과 입자의 항력에 의하여 연소가스와는 다른 이동 경로를 따라 이동하였다. 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.

활성탄 입자의 크기에 따라 연소가스와 활성탄 입자의 체류시간은 다소의 차이가 발생하였다. 활성탄의 입자크기가 클수록 약간 체류시간이 줄어드는 것을 볼 수가 있는데 이는 입자의 크기가 큰 경우에는

단일 입자의 관성력이 더 크고, 항력이 더 크게 작용하기 때문에 저속 영역에서 연소가스와는 다른 경로를 따라 반응기 내를 이동할 가능성이 더 높기 때문이었을 것으로 판단된다.

현재 산정된 연소가스 및 활성탄 입자의 체류시간을 바탕으로 활성탄의 반응식과 적절히 조합한다면 좀 더 정확한 제거 효율을 산정하는 데 매우 효과적일 것이며 반응기의 최적설계에 유용하게 사용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 박병현, 조영민 (2004) 백필터 집진기의 탈진 효과 연구, 한국대기환경학회 2004년 춘계학술대회논문집, 449-450.
- 이상권, 이성철, 정경숙, 한영욱 (1997) 백필터에서의 아황산가스(SO₂) 제거에 관한 실험적 고찰, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 1, 129-130.
- 윤성환, 이상권 (2004) 백필터에서의 Multi-Pollutants 제어 특성, 한국대기환경학회 2004년 추계학술대회논문집, 233-234.
- Choi, C.R. and C.N. Kim (1999) Thermohydraulic characteristics of two-phase flow in a submerged gas injection system, *Journal of KSME*, B23, 10, 1327-1339.
- Haider and O. Levenspiel (1989) Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, *Powder Technology*, 58, 63-70.
- Hinze, J.O. (1975) *Turbulence*, McGraw-Hill Publishing Co., New York.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow*, hemisphere, Washington, D.C.