SCR 촉매층 형상변화에 따른 침식특성에 관한 수치해석적 연구

박 훈 채,[1] 최 항 석,[*2] 최 연 석[3]

NUMERICAL STUDY ON THE EROSION CHARACTERISTICS OF SCR CATALYST DUCT BY VARYING ITS GEOMETRICAL CONFIGURATION

Hun Chae Park,[1] Hang Seok Choi[*2] and Yeon Seok Choi[1]

The SCR catalyst in coal-fired power plant is eroded by the collision of fly ash on the catalyst surface. However the erosion of SCR catalyst by the collision of fly ash has not been fully studied, especially in terms of fluid dynamics. Hence, in the present study, we focus on the gas and solid flows inside the SCR catalyst duct and their consequent effect on the erosion characteristics. For this purpose, computational fluid dynamics is applied to investigate the two-phase flows and to evaluate the erosion rate for different flow and particle injection conditions. Also, the erosion rate and pressure drop of commonly used square shape are compared with equilateral triangle and hexagon shapes. The pressure drop of SCR catalyst is increased when SCR catalyst surface area per unit volume increases. The erosion rate of SCR catalyst is enhanced when the particle velocity, mass flow rate of particle, particle diameter and cell density of SCR catalyst are increased. From the results, the pressure drop and erosion rate at the catalyst surface can be minimized by reducing cell density of SCR catalyst to decrease particle velocity and number of particle impacts.

Key Words : 비산회(Fly ash), 전산유체역학(CFD), 침식(Erosion), SCR 촉매(SCR catalyst)

1. 서 론

암모니아에 의한 SCR(Selective Catalytic Reduction : 선택적 촉매환원)공정은 화력발전소, 산업용 보일러, 소각로와 같은 연소설비에서 발생하는 질소산화물을 제거하기 위하여 사용된다. 이러한 SCR 공정은 배기 가스중에 환원제인 암모니아를 주입하여 촉매상에서 질소산화물과 반응시켜 무해한 질소와 물로 전환하는 배연처리 기술로써, 여러 종류의 촉매들이 개발되어 상용화 되고 있다. 석탄화력발전소에서 사용되는 SCR 촉매는 배기가스에 포함된 fly ash의 충돌에 의하여 침식(erosion)이 발생하며, SCR 촉매의 침식은 촉매의 활성도 감소를 촉진시키기 때문에 석탄화력발전소 운전시 고려되어야 할 중요한 문제이다. 따라서 fly ash에 의한 SCR 촉매의 침식률을 측정하여 수명을 예측하는 것은 장치의 효율적인 유지 및 관리를 위하여 중요하며, SCR 촉매의 침식 감소를 위한 설계 개선 및 대체 소재 개발을 위하여 필수적으로 요구되어지고 있다.

입자 충돌에 의한 침식은 입자의 크기 및 형상, 충돌각도 및 속도 그리고 재료의 경도 및 형상 등에 영향을 받는다. 또한 입자 침식 기구는 재료의 연성(ductility)에 따라 다르게 나타난다. SCR 촉매의 내침식성 평가는 실제 field test를 수행하는 것과, 침식환경을 재현할 수 있는 실험장치를 이용하여 평가 할 수 있지만, 두 방안의 경우 많은 비용과 기술적인 어려움이 뒤따르고 장시간의 실험이 소요되기 때문에 국내에서는 거의 수행되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 입자 충돌시 SCR 촉매 침식 특성에 대한 전산해석을 통하여 침식률에 대한 SCR 형상 및 침식 파라미터(입자속도, 입자 질량유량, 입자크기)의 영향을 분석하여 SCR 촉매의 침식을 최소화하는 설계를 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

접수일: 2011년 1월 5일, 심사완료일: 2011년 6월 2일,
게재확정일: 2011년 6월 7일.
1 정회원, 한국기계연구원, 그린환경기계연구본부
2 정회원, 한국기계연구원, 그린환경기계연구본부
3 한국기계연구원, 그린환경기계연구본부
* Corresponding author, E-mail: hschoi@kimm.re.kr

2. 계산방법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 덕트 내의 유동 해석을 위하여 정상상태 비압축성유동을 가정하였다. 계산영역 내의 정상상태 유동에 대한 지배방정식은 식 (1)의 연속 방정식과, 식 (2)의 운동량 방정식이 사용되었으며, 난류 유동장의 해석을 위하여 realizable $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였다. Realizable $k-\varepsilon$ 모델의 난류 운동에너지 k와 난류 소산율 ε에 대한 방정식은 식 (3)-(4)와 같다.

- Continuity equation

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

- Momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j)=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right) \tag{2}$$

- Turbulent kinetic energy, k, equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon \tag{3}$$

- Turbulent dissipation rate, ε, equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{\varepsilon 1}\sqrt{2S_{ij}S_{ji}}\,\varepsilon-C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

난류 운동은 난류 강도를 나타내는 속도 스케일과 난류 크기를 나타내는 길이 스케일의 두 가지 특성으로 표현할 수 있으며, 식 (5)와 같이 레이놀즈 응력이 평균 속도의 변형률에 비례한다고 가정한 Boussinesq의 모델을 사용하였다. 식에서 μ_t는 난류 점성계수로써 식 (6)과 같이 정의되고, k는 난류운동에너지, δ_{ij}는 Kronecker delta 이다.

$$-\rho\overline{u_i' u_j'}=\mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{5}$$

$$\mu_t=\lambda(\mu_t)_{k-\varepsilon}+(1-\lambda)\mu\left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)_{2layer} \tag{6}$$

$$\lambda=\frac{1}{2}\left[1+\tanh\left(\frac{Re_y-60}{A}\right)\right],\ A=\frac{|\Delta Re_y|}{\tanh 0.98} \tag{7}$$

식 (3)에서 G_k는 평균 속도 구배에 의한 난류 운동에너지의 발생을 의미하며 식 (8)과 같이 정의되고, 모델 상수 $C_{\varepsilon 1}$은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$G_k=\mu_t\left(\sqrt{2S_{ij}S_{ji}}\right)^2 \tag{8}$$

$$C_{\varepsilon 1}=\max\left(0.43,\frac{\sqrt{2S_{ij}S_{ji}}\,k/\varepsilon}{5+\sqrt{2S_{ij}S_{ji}}\,k/\varepsilon}\right) \tag{9}$$

그 외의 모델 상수들은 다음의 값들을 적용하였다.

$$C_{\varepsilon 2}=1.9,\ \sigma_k=1.0,\ \sigma_\varepsilon=1.2 \tag{10}$$

본 연구에서는 realizable $k-\varepsilon$ 모델과 Two-layer 벽면 처리 기법을 이용하여 대수 영역과 점성저층 영역으로 나누어 계산하였다. 대수 영역과 점성저층 영역은 난류 Re수인 $Re_y=\sqrt{k}\,y/\upsilon$에 의해 구분된다. y는 벽으로부터 격자점까지의 거리이며, $Re_y=60$을 기준으로 대수 영역과 점성저층 두 영역을 구분한다. $Re_y>60$ 의 경우 대수 영역으로써 realizable $k-\varepsilon$ 모델을 적용하고, $Re_y<60$ 의 경우에는 점성저층 영역으로 Wolfstein[1]의 one-equation 모델을 적용한다.

2.2 Solid phase modeling

SCR 촉매의 침식을 일으키는 주요 원인은 배기가스 내에 혼입된 fly ash 고체 입자들이 벽면에 충돌함으로써 발생된다. 따라서 본 연구에서는 Eulerian-Lagrangian 방법을 사용하여 유체 유동장은 앞절의 지배방정식을 이용하는 Eulerian 방법으로 해석하고, 각 입자들의 궤적은 Lagrangian 방법을 사용하여 입자의 거동과 벽면 충돌 현상을 수치적으로 모사하였다.

본 연구에서는 입자에 가해지는 힘과 관성력을 같게 놓는 Basset-Boussinesq-Oseen 방정식을 사용하여 입자의 거동을 해석하였다. Basset-Boussinesq-Oseen 방정식은 입자의 관성력과 외력의 평형을 통해 입자의 거동을 예측하는 Force Balance Method의 일종으로 입자간의 상호작용을 고려하지 않으므로 공기 중의 입자의 농도가 적을 경우 유효한 방법이다[2]. 본 연구에서는 virtual mass force, basset force, pressure gradient force에 관련된 항은 무시하고 공기역학적 항력만을 고려하였고 입자는 구형이라고 가정하였다. 그 결과식을 표현하면 다음과 같다.

$$m_p\frac{d\vec{v_p}}{dt}=\frac{1}{2}C_D\rho A_p(\vec{u}-\vec{v_p})|\vec{u}-\vec{v_p}| \tag{11}$$

식에서 $\vec{v_p}$는 입자의 속도, $\vec{u}$는 현재 입자가 위치한 지점에서의 기체속도이고 C_D는 항력계수이다. 구형에 대한 입자의 항력계수 C_D는 Clift et al.[3]가 제시한 다음의 식을 사용하였다.

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}\left(1+0.15Re_p^{0.687}\right), & Re_p \le 1000 \\ 0.424, & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (12)$$

식에서 Reynolds number는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{v_p}|}{\mu} \quad (13)$$

본 연구에서는 난류 분산을 고려하기 위하여 Goasman과 Ioannides [4]등이 개발한 모델을 사용하여 입자가 난류 eddy와 작용하는 시간을 계산하였다. Gosman과 Ioannides 모델은 $k-\varepsilon$난류 모델로부터 구한 난류 운동에너지와 소산율을 사용하여 eddy life time을 계산하고 이로부터 식 (14)와 같이 입자와 eddy 사이의 상호작용시간 t_I를 계산한다.

$$t_I = \min(t_e, t_c) \quad (14)$$

식에서 t_e는 eddy life time으로 $t_e = l_e/(2k/3)^{1/2}$이고, turbulent length scale $l_e = C_\mu^{3/4} k^{3/2}/\varepsilon$이다. 입자가 eddy를 지나는데 걸리는 시간 t_c는 선형화된 입자의 운동방정식으로부터 계산할 수 있으며 식 (15)와 같다. 식에서 τ는 입자 이완 시간이다.

$$t_c = -\tau \ln\left(1 - \frac{l_e}{\tau|\vec{u} - \vec{v_p}|}\right) \quad (15)$$

2.3 Erosion modeling

입자 충돌에 의한 SCR 촉매 표면의 침식률(E)은 식 (16)에 의해 계산되었으며, 식 (16)에서 A는 충돌 표면의 면적, $\dot{m}_\pi$는 표면에 충돌하는 입자의 질량유량, 그리고 $E(\theta)$는 침식비를 나타낸다.

$$E = \frac{1}{A}\sum_\pi \dot{m}_\pi E(\theta) \quad (16)$$

침식률은 유동 특성과 침식비에 의해 계산되어지며, 본 연구에서의 침식비 계산은 식 (17)의 Oka et al.[5, 6]의 실험식을 이용하여 계산하였다.

$$E(\theta) = g(\theta) E_{90} \quad (17)$$

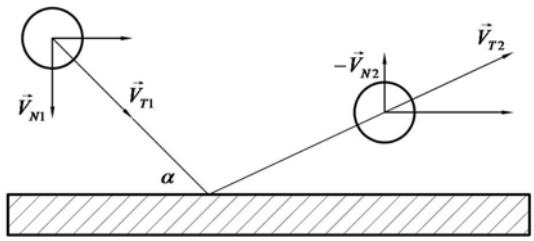


Fig. 1 Collision of a particle with a wall surface

$$g(\theta) = (\sin\theta)^{n_1}(1 + H_V(1-\sin\theta))^{n_2} \quad (18)$$

$$E_{90} = K(H_V)^{k_1}\left(\frac{V_p}{V'}\right)^{k_2}\left(\frac{D_p}{D'}\right)^{k_3} \quad (19)$$

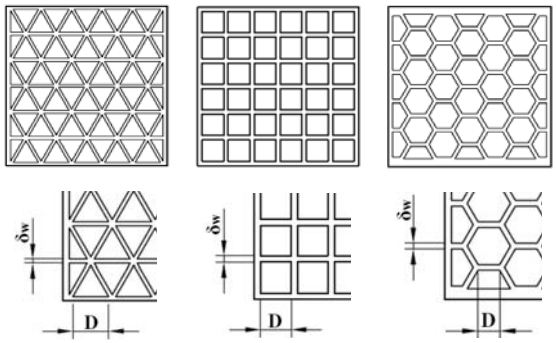
$$n_1 = s_1(H_V)^{q_1},\ \ n_2 = s_2(H_V)^{q_2},\ \ k_2 = 2.3(H_V)^{0.038} \quad (20)$$

입자 충돌로 인한 재료의 침식비는 식 (17)과 같이 입자의 충돌각이 90°일때의 침식비(E_{90})와 입자의 충돌각 함수 $g(\theta)$의 곱으로 나타내어진다. 입자 충돌각은 재료의 경도에 따라 변하기 때문에 $g(\theta)$는 식 (18)에서 보는 바와 같이 입자의 충돌각과 충돌면 재료의 경도(H_V)의 함수로 나타낸다. E_{90}은 충돌입자가 충돌재료의 면과 90°로 충돌할 때의 침식비이며, 식에서 V_p와 V'는 입자의 충돌속도와 Oka et al.[5, 6]의 실험값인 reference 속도, D_p와 D'는 충돌입자의 직경과 입자의 reference 직경이다. 식 (18)-(20)에서 각 계수는 충돌면 재료의 경도와 충돌 입자의 특성에 의해 결정되어지며, SCR 촉매의 경도와 충돌 입자 SiO_2에 대한 각 계수 및 reference 값은 $s_1 = 0.71$, $s_2 = 2.4$, $q_1 = 0.14$, $q_2 = -0.94$, $K = 65$, $k_1 = -0.12$, $k_3 = 0.19$, $V' = 104\,m/s$, $D' = 326\,\mu m$이다.

2.4 Particle rebound modeling

입자는 화력 발전소에서 발생되는 fly ash의 주성분인 SiO_2로 설정하였으며, 입자를 입구영역의 전면에 균일하게 분포시켜 가스와 동일한 속도로 유동장내에 입사 하였다. 유동장 내 입사된 고체 입자는 Fig. 1과 같이 입자의 충돌 전 속도와 각도(α)에 따라 충돌 후 입자의 속도 및 궤적은 변하게 된다. 본 연구에서는 벽면에 충돌하는 입자는 비탄성 충돌하는 것으로 모델링하여 입자의 충돌 속도에 의해 벽면의 침식률을 계산하였으며, 벽면에 충돌된 입자는 벽면과 입자의 반발계수(restitution coefficients)를 이용하여 충돌 후 입자의 속도를 계산하였다.

벽면 충돌 후의 입자 속도($\vec{V}_2$)는 식 (21)-(22)와 같이 반발



(a) Equilateral triangle (b) Square (c) Hexagon

Fig. 2 Configuration of the SCR catalyst

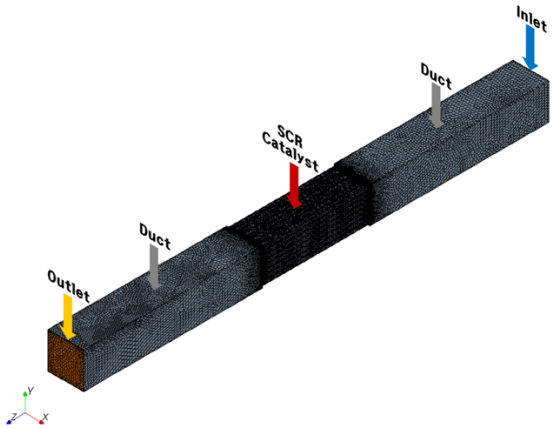


Fig. 3 Computational domain and grid allocation

계수(R)와 충돌 전 입자 속도($\vec{V}_1$)의 곱으로 나타내어진다. 하첨자 1, 2는 입자 충돌 전·후를 의미하고 T, N은 접선 및 수직방향을 의미한다. 반발계수 R은 입자의 벽면 충돌 전·후의 속도비이며, 입자와 벽면을 구성하는 물질에 따라 결정된다. 보통 반발계수 R은 0≤R≤1의 값을 가지며 반발계수가 1인 경우 운동량과 운동에너지가 보존되는 완전 탄성 충돌이고, 0인 경우에는 완전 비탄성 충돌로써 충돌 후 두 물체는 하나가 되어 운동한다. 본 연구에서는 접선 및 수직 방향 반발계수를 Forder[7]의 실험식 식 (23)-(24)을 이용하여 충돌 후 입자의 속도를 계산하였다.

$$\vec{V}_{T2} = R_T \vec{V}_{T1},\ \vec{V}_{N2} = -R_N \vec{V}_{N1} \tag{21}$$

$$\vec{V}_2 = R_T \vec{V}_{T1} - R_N \vec{V}_{N1} \tag{22}$$

$$R_T = 1 - 0.78\alpha + 0.84\alpha^2 - 0.21\alpha^3 + 0.028\alpha^4 - 0.022\alpha^5 \tag{23}$$

$$R_N = 0.988 - 0.78\alpha + 0.19\alpha^2 - 0.024\alpha^3 + 0.027\alpha^4 \tag{24}$$

Table 1 Geometric properties of SCR catalyst for the different cell shapes[9]

Cell geometry	Equilateral triangle	Square	Hexagon
n	$\frac{2.3}{(D+\delta_w)^2}$	$\frac{1}{(D+\delta_w)^2}$	$\frac{0.38}{(D+\delta_w)^2}$
ε	$\frac{(D-0.73\delta_w)^2}{(D+\delta_w)^2}$	$\frac{D^2}{(D+\delta_w)^2}$	$\frac{(D+0.42\delta_w)^2}{(D+\delta_w)^2}$
D_h	$D_h = \sqrt{\varepsilon}\delta_w/(1-\sqrt{\varepsilon})$		
σ	$\sigma = 4(\sqrt{\varepsilon}-\varepsilon)/\delta_w$		

2.5 계산영역 및 격자

SCR 촉매는 평행한 셀(cell)들로 구성되어 있으며 cell 단면은 square, equilateral triangle, diamond, hexagon 등의 다양한 형태를 가진다. 실제 대형 화력발전플랜트에서는 사각형 형태의 honeycomb type과 삼각형 형태의 corrugate type SCR 촉매가 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 cell 형상 및 크기에 따른 압력강하 및 침식 특성에 대한 연구를 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 SCR 촉매를 equilateral triangle, square, hexagon 형상으로 모델링하여 전산해석 하였다. Table 1은 각기 다른 모양을 갖는 SCR 촉매의 기하학적 특성을 cell의 내부모서리 길이 D와 벽두께 δ_w의 함수로 나타낸 표이며, 원하는 cell의 형상에 대해 D와 δ_w을 변화시켜 SCR 촉매의 수력직경(D_h), 단위 체적당 표면적(σ), cell 밀도(n)와 공극률(ε)을 결정하였다. Cell의 주요 치수와 cell Re수는 Table 2와 같으며 각 형상의 공극률을 동일하게 하여 압력강하 및 침식률을 계산하였다.

입자 충돌에 의한 SCR 촉매의 침식률을 전산해석 하기 위하여 Fig. 3과 같이 계산영역을 구성하였다. 본 연구에서는 다면체(polyhedron) 격자를 이용하여 계산 격자를 구성하였으며, 벽 근처 경계층은 조밀한 격자를 생성하여 y^+<30를 만족하도록 하였다. 수치해의 정확도는 계산영역내의 격자수에 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 계산을 수행하기 전 격자수 부족으로 인한 계산 결과의 오차를 차단하기 위하여 각 case별로 격자 의존성 연구를 수행하였다. Fig. 4는 case1의 격자 의존성 연구를 수행한 결과이며, 압력강하와 침식률을 함수로 하여 격자수를 증가하며 수치해의 격자 의존성 연구를 수행하였다. 압력강하와 침식률은 약 150만개 이상의 격자수에서 수렴하는 경향을 보이며, 본 연구에서는 압력강하와 침식률이 수렴하는 최소 격자수를 선택하여 계산을 수행하였다.

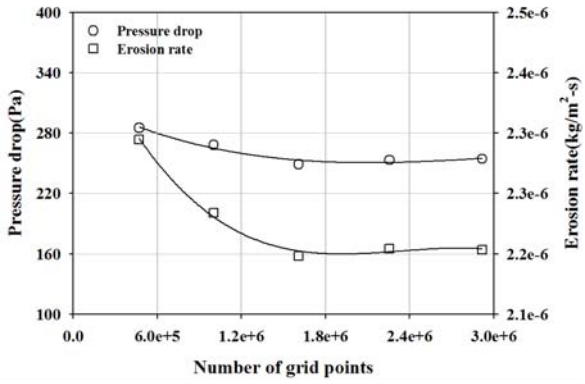


Fig. 4 Grid independence test

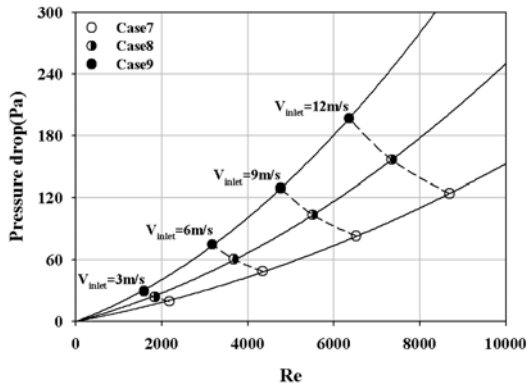


Fig. 5 Variation of pressure drop for various hexagon shapes

그리고 각 지배방정식의 수렴 척도는 나머지(residual)를 10^{-4} 이하로 설정하여 계산의 신뢰도를 높였다.

2.6 계산방법 및 조건

본 전산해석연구는 상용코드인 STAR CCM+ Ver.5.02[8]를 이용하여 수행되었으며, 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 위의 절에 나열한 지배방정식들을 이산화(discretization) 하였다. 이산화시 각 방정식들의 공간미분에 관한 항들은 이차 풍상 차분법(Second Order Upwind Scheme)을 사용하여 차분화 하였다. 압력장의 처리는 연속 방정식을 이용하여 압력 보정 방정식을 유도하고 해를 구하여 그 결과를 제어체적면(control volume)의 질량 보존 법칙에 따라 압력과 속도를 연결시키는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

입자 충돌로 인한 재료의 침식률을 결정하는 주요 인자는 입자의 충돌 속도, 입자 크기 및 형상, 충돌각, 소재의 경도 및 형상 그리고 주변온도 등이다. 본 연구에서는 입자의 충돌 속도, 입자 질량유량, 입자크기를 변수로 하여 해석을 수행하였다. 입자 충돌 조건에 따른 침식 특성을 파악하기 위하여 입자 속도 6m/s, 입자 질량유량 6g/s, 입자크기 60㎛을 기준으로 각각의 변수를 변화하며 해석을 수행 하였으며, 각 변수의 계산 범위는 입자속도 3~12m/s, 입자 질량유량 3~12g/s, 입자크기 30~120㎛ 이다.

3. 계산결과

3.1 압력강하 특성

촉매의 충진으로 인한 배기 덕트내 압력손실은 시스템 전체의 운전과 직결되기 때문에 SCR 설비 설치시 가장 먼저 고려해야 할 중요 설계인자이다. 특히, 석탄화력발전소에서는 배기가스에 포함된 fly ash로 인한 cell 막힘 현상도 고려되어야 하는데, 이를 방지하기 위해서는 적당한 cell 크기 이상의 촉매를 사용해야 하며 촉매층 길이에 따른 압력손실도 고려해야 한다. 이러한 압력손실은 cell 크기 및 형상 그리고 배기가스 유량에 의해서 결정된다. 따라서 본 연구에서는 촉매의 cell 크기 및 형상에 따른 압력손실을 계산하였다.

Fig. 5는 육각형 형상의 SCR 촉매에 대하여 입·출구 단면에서의 압력을 면적 평균하여 cell Re수 변화에 따른 압력손실 변화를 나타낸 것이다. Cell Re수는 cell의 수력직경(D_h)과 cell 내에서의 속도를 기준으로 계산 하였다. 각각의 경우 cell Re수가 증가 하면 ΔP가 증가하나, 동일한 입구속도 조건에서 cell의 수력직경이 감소할수록 Table 2에서 보는 바와 같이 cell 밀도 증가로 인해 단위 체적당 표면적이 증가하기 때문에 압력강하는 증가한다. Fig. 6은 cell 형상에 따른 압력강하를 나타낸 것으로 덕트 전 단면에 걸친 총 유동 단면적이 동일한 조건일 때 즉, 공극률이 동일할 때 cell 형상에 따른 압

Table 2 Dimensions of SCR catalyst

Case	Cell type	ε	D_h (mm)	n $(1/mm^2)$	σ (m^2/m^3)	Cell Re number (V_{Inlet}=6m/s)
1	Equilateral triangle	0.64	4.09	0.046	0.667	2500
2		0.64	3.46	0.064	0.783	2110
3		0.64	3	0.086	0.898	1830
4	Square	0.64	6.03	0.027	0.429	3680
5		0.64	5.16	0.037	0.500	3150
6		0.64	4.52	0.049	0.572	2760
7	Hexagon	0.64	7.1	0.023	0.424	4350
8		0.64	6	0.032	0.491	3670
9		0.64	5.19	0.043	0.557	3170

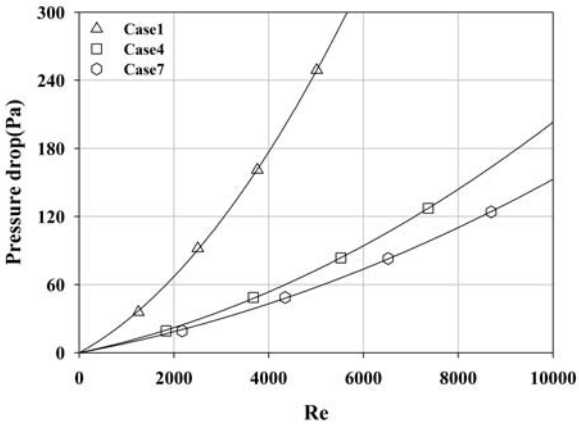


Fig. 6 Variation of pressure drop for three different cell shapes

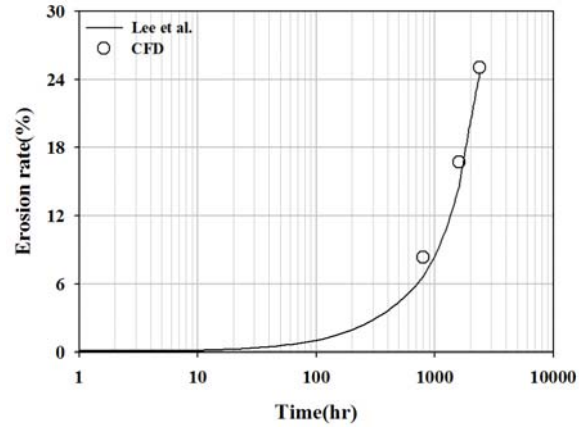


Fig. 7 Comparison of erosion rate between experiment and the present CFD

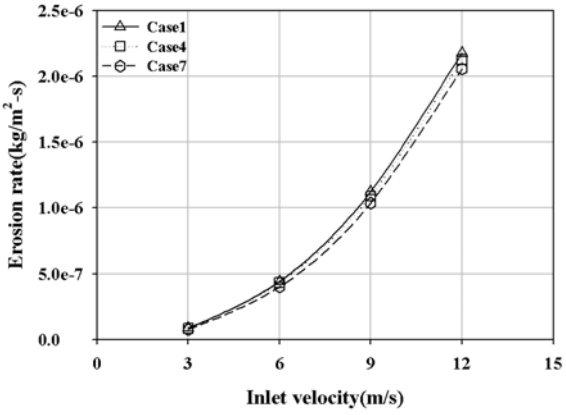


Fig. 8 Variation of erosion rate with increasing inlet velocity

력강하는 단위 체적당 표면적(σ)이 큰 Case1이 압력강하가 가장 크게 나타나며, 표면적이 작은 Case7이 가장 적게 나타난다. 이는 총 유동 단면적이 동일한 조건일 때 cell의 수력직경이 클수록 Table 2에서 보는 바와 같이 cell 밀도 및 단위 체적당 표면적이 감소하는데 기인한다.

이러한 SCR시스템의 압력손실의 경우 시스템 운전 비용과 직결되므로 압력손실의 비용측면을 고려한다면 가급적 단위 체적당 표면적 및 속도가 작게 설정되어야 하나, NO 전환율 및 미반응 암모니아 등 질소산화물의 환원 반응과의 역학관계가 반영되어야 하기 때문에 적정한 범위의 표면적 및 속도를 설정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

3.2 침식 파라미터 변화에 따른 침식율 특성

본 연구에서는 fly ash에 의한 SCR 촉매의 침식 특성에 대한 연구를 수행하기 위하여 침식 모델을 구성하고 전산해석을 통하여 침식현상을 모사하였으며, 본 연구에서 채택한 침식 모델의 적합성을 실험결과와 비교를 통하여 평가하였다. Fig. 7은 침식시간 변화에 따른 SCR 촉매의 침식률을 Lee. et al.[10]의 실험결과와 비교한 것이다. 석탄화력 발전소에서 사용되는 SCR 촉매는 장기간 운전시 배기가스에 포함된 fly ash에 의하여 촉매 cell이 막히는 cell plugging 현상이 발생한다[11]. 이 현상에 의해 SCR 촉매의 유동 면적은 감소되고 압력강하 및 cell을 통과하는 입자의 속도는 증가하게 된다[11, 12]. 입자의 속도는 재료의 침식에 가장 큰 영향을 주는 인자로써 침식률은 입자 충돌 속도의 2.3~2.7승에 비례한다[13]. 따라서 SCR 촉매 시스템의 운전시간이 경과할수록 cell plugging 현상에 의해 SCR 촉매의 유동면적은 점차 감소되고, 이로 인해 입자의 속도는 증가하기 때문에 SCR 촉매의 침식은 점차 증가하게 된다[12]. Fig. 7에서 보는 바와 같이 실험결과는 시간이 경과할수록 침식이 점차 가속화된다. Fig. 7에서 계산치를 실험치와 비교해 보면 계산결과와 실험결과와의 최대 차이는 13%로 본 연구의 목적에 크게 벗어나지 않는다고 할 수 있다.

침식 파라미터 중 입자의 충돌 속도가 침식률에 미치는 영향을 평가하기 위하여 입구 유동 속도를 3~12m/s로 변화 하며, SCR 촉매의 침식률을 계산하였다. Fig. 8은 입자 질량유량 6g/s, 입자크기 60㎛ 일 때 입구 유동 속도 변화에 따른 SCR 촉매 전단면에서의 침식률을 나타낸 것으로 속도가 증가함에 따라 입자의 운동에너지가 증가하기 때문에 침식률은 증가한다[9]. 유동 속도에 대한 영향은 NO 전환률 및 저속에 따른 촉매표면의 입자 침적 가능성과 고속에 따른 촉매의 침식 문제를 동시에 고려해야 한다. 따라서 SCR 시스템 설계시는 비용과 성능의 관계를 고려해서 촉매의 침식 특성에 따라 입자 충돌속도를 고려하여 설계인자를 설정하는 것이 효율적

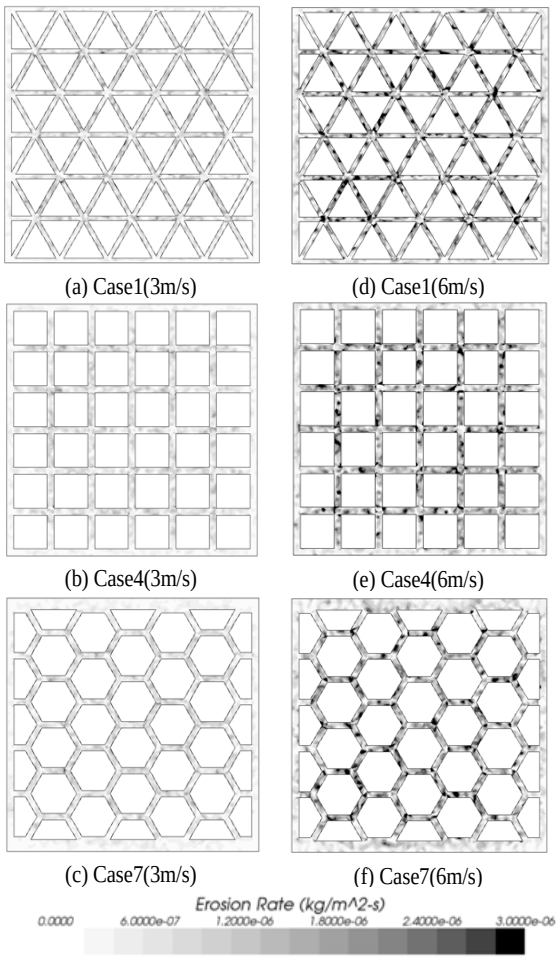
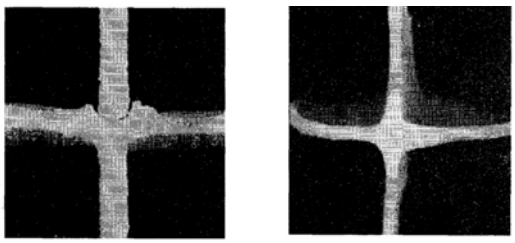


Fig. 9 Contours of erosion rate with increasing inlet velocity



(a) Fresh catalyst (b) Exposed for 2 months

Fig. 10 Erosion of SCR catalyst[15]

일 것으로 판단된다. Fig. 9(a)~(f)는 각 형상 전단면의 침식률 분포를 나타낸 것으로 속도가 증가함에 따라 입자 충돌에 의해 침식률이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 10에

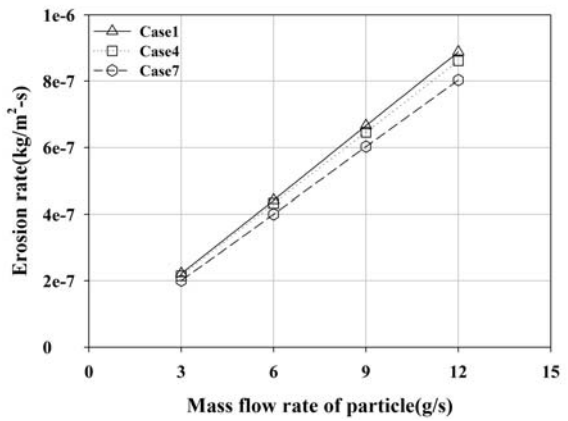


Fig. 11 Variation of erosion rate with increasing mass flow rate of particle

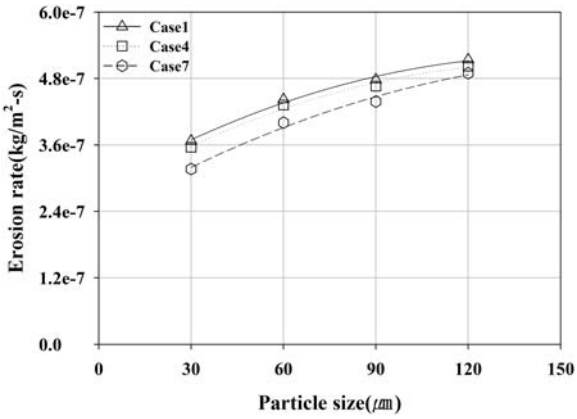


Fig. 12 Variation of erosion rate with increasing particle size

서 배기가스에 포함된 fly ash 충돌에 의한 촉매 전단면에 실제 침식이 Fig. 9와 같이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 입자 충돌로 인한 침식률 분포는 덕트 벽면보다 유동속도가 빠른 덕트 중앙에서 침식률이 높게 나타난다.

입자의 질량유량이 침식률에 미치는 영향을 평가하기 위하여 질량유량을 3~12g/s 까지 변화하며 SCR 촉매의 침식률을 계산하였다. Fig. 11은 유동속도 6m/s, 입자크기 60㎛ 일 때 입자 질량유량 변화에 따른 SCR 촉매의 침식률을 나타낸 것으로 질량유량이 증가함에 따라 침식률은 선형적으로 증가한다. 이러한 계산결과는 입자의 질량유량이 증가 할수록 SCR 촉매의 단위 면적당 충돌 입자 수가 증가하기 때문이다.

석탄화력발전소에서 사용되는 SCR 촉매는 배기가스에 포함된 fly ash에 의하여 cell plugging 현상과 침식이 발생한다. Fly ash는 미분탄(pulverized coal)이 연소되는 과정에서 발생하는 1~200㎛ 크기의 고체입자로써, 주성분이 SiO_2, Al_2O_1 및

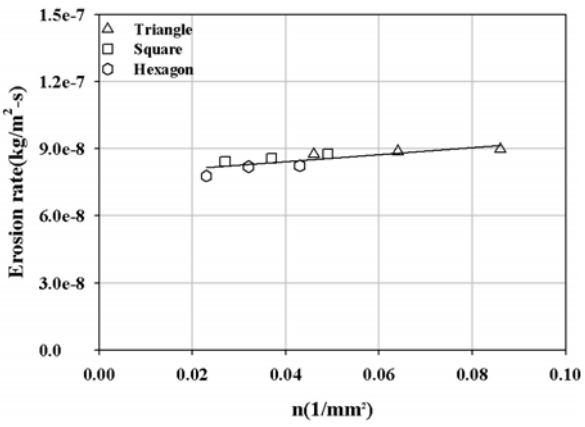


Fig. 13 Variation of erosion rate with cell varying cell density and cell shape

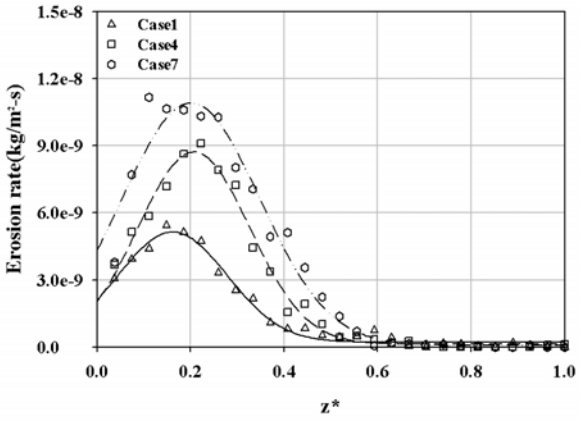


Fig. 14 Erosion rate along the streamwise direction

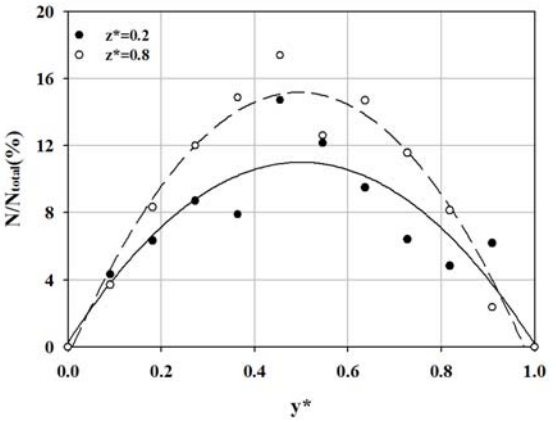


Fig. 15 Distribution of particles in a cell for case4

Fe_2O_3 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 입자크기가 침식률에 미치는 영향을 평가하기 위하여 입자 크기를 30~120㎛로 변화하며, SCR 촉매의 침식률을 계산하였다. Fig. 12는 유동속도 6m/s, 입자 질량유량 6g/s 일 때 입자크기 변화에 따른 침식률을 나타낸 것으로 SCR 촉매의 침식률은 입자크기가 증가함에 따라 질량유량의 경우에 비해 완만하게 증가한다 [14].

3.3 Cell 형상 변화에 따른 침식률 특성

Fig. 13은 cell 공극률과 유동 조건(입구 유동속도 6m/s, 입자 질량유량 6g/s, 입자크기 60㎛)이 동일 할 때 cell 밀도 변화에 따른 전단면에서의 침식률을 나타낸 것으로 (Case1~Case9) cell 밀도가 증가할수록 침식률은 증가한다. 형상에 따른 침식률은 cell 밀도가 작은 Cases7~9가 낮으며, cell 밀도가 큰 Cases1~3이 높게 나타난다. 이러한 계산결과는 SCR 촉매의 cell 밀도가 높을수록 전단면에 충돌하는 입자수가 증가하기 때문이다. 따라서 SCR 촉매의 침식을 감소하기 위해서는 입자 충돌 속도 및 단위 면적당 충돌하는 입자수를 감소시키는 것이 중요하며, 이를 위해 SCR 촉매 설계시 cell 밀도 및 벽 두께를 작게 설계하는 것이 요구된다.

Fig. 14는 SCR 촉매 cell 내부 표면의 침식률 분포를 나타낸 것으로 z*는 z축 방향의 SCR 촉매 길이를 촉매 전체 길이로 나누어 무차원한 수이다. SCR 촉매 cell 내부의 침식특성은 그림에서 보는 바와 같이 입구영역(z*=0~0.2)에서 크게 나타나며, 내부 유동이 발달 할수록 벽면에서의 침식률은 점차 감소한다. SCR 촉매의 cell 안으로 유입되는 입자는 촉매 전단면에 충돌 후 속도가 감소되어 유입되는 입자와, 전단면에 충돌하지 않고 유입되는 입자가 서로 혼합되어 유입된다. 따라서 전단면에 충돌하는 입자 수가 증가할수록 cell 내부에 유입되는 입자의 운동량은 감소하기 때문에 Figs. 8과 14에서 보는 바와 같이 전단면에서의 침식률이 클수록 cell 내부의 입구영역에서의 침식률은 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

또한 후류 영역($z^* \geq 0.2$)에서 침식률 및 입자의 거동에 대해 살펴보면 다음과 같다. 내부 유동에서 유체 내의 입자는 벽 부근에서 전단응력에 의한 힘이 입자에 작용하기 때문에 입자는 채널의 중심부로 양력(lift force)을 받는다[16]. 이로 인하여 대부분의 입자는 채널 중심부에 많이 분포한다[16]. Fig. 15는 Case4의 z*=0.2, z*=0.8에서의 cell 내부 입자 분포를 나타낸 것이다. y*는 y축 방향 cell의 폭 길이를 전체 폭 길이로 나누어 무차원한 수이며, y축 방향으로 cell 단면을 10등분하여 각 구간내의 입자분포를 N/N_{total}로 표시하였다. N_{total}은 cell을 통과하는 전체 입자 수이고, N은 해당 구간내 포함된 입자 수이다. 그림에서 보는 바와 같이 입자는 cell 벽에서 중심으로 갈수록 증가하며, 유동이 발달할수록 벽면에서의 입자

수는 감소하고 cell 중심에서의 입자 수는 증가한다. 따라서 cell 내부 유동이 발달 할수록 벽면에서 충돌하는 입자 수 감소로 인하여 Fig. 14에와 보는 바와 같이 z*=0.2 이후에는 침식률이 점차 감소한다.

4. 결 론

본 연구에서는 석탄화력 발전소에서 사용되는 SCR 촉매층을 모델링하여 cell 형상에 따른 압력강하 및 침식률에 대한 영향을 분석하여 SCR 촉매의 압력강하 및 침식 감소를 위한 기초 자료를 아래와 같이 확보 하였다.

(1) SCR 촉매는 전단면에서의 침식률이 클수록 cell 내부에서의 침식률은 감소하며, cell 내의 유동이 발달 할수록 벽면에 충돌하는 입자 수의 감소로 인하여 침식률은 점차 감소한다. SCR 촉매 cell 내부의 침식은 전단면 보다 크지 않기 때문에 SCR 촉매 설계시 침식이 많이 발생하는 SCR 촉매 전단면 설계에 중점을 두고 설계해야 될 것으로 판단된다.

(2) SCR 촉매의 압력 강하 및 침식을 최소화하기 위해서는 단위 체적당 표면적 및 입자 충돌 속도 등을 감소시키는 것이 중요하다. 이를 위해서는 SCR 촉매 설계시 단위 체적당 표면적, cell 밀도 및 벽 두께를 작게 설계하는 것이 요구되나, cell 밀도가 감소할수록 단위체적당 SCR 촉매의 표면적 감소로 인하여 NO 전환률이 감소하기 때문에 적절한 범위의 표면적 및 cell 밀도를 설정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 전력산업원천기술개발 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 1969, Wolfstein, M., "The velocity and temperature distribution in one-dimensional flow with turbulence augmentation and pressure gradient", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.12, pp.301-318.

[2] 2000, Crowe, C., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., "Multiphase Flows with Droplets and Particles," *CRC Press*, Boca Raton, FL.

[3] 1973, Clift, R. et al., *Bubbles, Drops and Particles*, *Academic Press*, New York.

[4] 1983, Gosman, A.D., and Ioannides, E. ″Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors,″ *AIAA, J. Energy*, Vol.7, pp. 482-490.

[5] 2005, Oka, Y.I, Okamura, K., and Yoshida, T., "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effect of impact parameters on a predictive equation," *Wear*, Vol.259, pp.95-101.

[6] 2005, Oka, Y.I. and Yoshida, T., "Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage," *Wear*, Vol.259, pp.102-109.

[7] 1998, Forder, A., Thew, M. and Harrison, D., "A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oil field control valves," *Wear*, Vol.216, pp.184-193.

[8] 2010, CD-adapco, *STAR-CCM+ user guide version 5.02*, *CD-adapco*, New York.

[9] 2005, Alexis T.B. and Kamil K., *Catalysis Reviews*, *Taylor & Francis*, UK

[10] 2002, Lee, I.Y. et al., "A paractical scale evaluation of sulfated V_2O_5/TiO_2 catalyst from metatitanic acid for selective catalytic reduction of NO by NH_3," *Chemical Engineering J.*, Vol.90, pp.267-272.

[11] 2005, Steven A. et al., "SCR catalyst performance in plue gases derived from subbituminous and lignite coals," *Fuel Processing Technology*, Vol.86, pp.577-613

[12] 2010, Stobert, T.R., "SCR catalyst design and management", *Proc. CEPSI 2010*, TS4505

[13] 1990, Humphrey, J.A.C., "Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol.11, p.170-195

[14] 2009, Nagarajan, R. et al., "Development of predictive model for fly-ash erosion phenomena in coal-burning boilers," *Wear*, Vol.267, pp.122-128.

[15] 2002, 김우영, 외1인, “SCR 촉매제조 상용화 기술 개발,” *연구 보고서*, 환경부, 서울.

[16] 1966, Brandt, A. and Bugliarello. G., "Concentration redistribution phenomena in the shear flow of monolayers of suspended particles," *Trans. Soc. Rheol*. Vol.10, pp.229-251.