

표면 코팅입자에 의한 석탄화력 발전용 보일러 파울링 수치적 연구

이병은[†] · 유갑종* · 신세현* · 권순범*

(2001년 8월 25일 접수, 2002년 1월 2일 심사완료)

Computational Study of Fouling Deposits Due to Surface-Coated Particles in Coal-Fired Power Utility Boilers

Byeong-Eun Lee, Kap-Jong Riu, Se-Hyun Shin and Soon-Bum Kwon

Key Words : Fouling(파울링), Surface-Coated Particle(표면코팅입자)

Abstract

Fouling deposits due to surface-coated particles have been calculated using CFD techniques. The sticking probabilities of the surface-coated particles are also evaluated on the basis of an energy balance. The sticking probabilities of the deposit surface are also included in the prediction of the deposition occurring through the multiple impaction of particles with the deposit surface. The sticking probability of an impacting particle is expressed in terms of such parameters as particle viscosity, surface tension, impact velocity, impact angle and the thickness of the sticky layer on a particle. Particulate behavior around a tube in cross flow was studied using the Lagrangian approach. Three important parameters i.e. impact velocity, impact angle, and particulate concentration, were used in the prediction of deposition rate. The computational predictions were found to be in good agreement with the experimental data.

	기호설명
A	: 코팅입자와 관 또는 파울링 표면의 접촉 면적 (m ²)
d_p	: 입경 (m)
$\langle d_p \rangle_s$: 외부기하학적표면적-비중 입자 크기 (m)
DE	: 입자충돌에 의하여 소산되는 에너지
D_i	: 성분 i 의 분자확산계수 (m ² /s)
IP	: 입자의 관과의 충돌확률 (무차원)
FP	: 일정한 크기의 입자 분율 (무차원)
m_p	: 입자의 질량 (kg)
Sh_p	: 입자 셔우드 수 (무차원)
t	: 배연가스에서의 거주시간 (s)
u_p^r	: 반사입자 속도 (m/s)

u_p^i	: 입사입자 속도 (m/s)
u_p^{ci}	: 코팅입자 내부 고체면의 충돌속도 (m/s)
W_i	: i 성분의 분자중량 (kg/kmol)
Y_i	: 회분에서 i 성분의 질량비 (무차원)
β	: 입자 충돌각 (degree)
ξ	: 입자의 점착계수 (무차원)
μ	: 입자 점착층과 관 또는 파울링 표면 사이의 마찰계수 (무차원)
δ	: 점착층 두께 (m)
ρ_i	: 배연가스에서 성분 i 의 농도 (kg/m ³)
$\dot{\rho}_i$: i 성분의 밀도 (kg/m ³)
τ	: 입자에의 황산나트륨 응축 특성시간 (s)
Φ_d	: 파울링 성장률 (입자 부착률)

1. 서론

석탄에 포함되어 있는 무기물질은 발전용 보일러 관관에 파울링(fouling), 침식(erosion) 및 부식

* 회원, 경북대학교 기계공학부

[†] 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학부

E-mail: ebyeong@knu.ac.kr
Tel: 053)950-7331, Fax: 053)956-9914

(corrosion) 등을 야기시킨다. 이 가운데 파울링은 저질탄을 사용하는 발전용 보일러 운전에 가장 나쁜 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Sondreal et al⁽¹⁾에 따르면 파울링이 심하게 발생하는 경우 보일러 출력의 10~20%, 열효율의 10%까지 줄어드는 것으로 알려져 있다. 더욱이 정상운전 상태에서 열교환 표면에 형성되는 제거하기 힘든 파울링은 보일러 이용도 저하에 가장 큰 원인이 되고 있다. 파울링이 심하게 발생하는 경우 보일러는 파울링 제거를 위하여 운전을 정지시키든지 아니면 출력과 열효율이 저하된 상태로 운전되어지게 된다. 이 같은 이유로 많은 연구자들이 파울링에 대한 광범위한 연구를 수행해오고 있다.⁽²⁾

발전용 보일러 노(furnace) 내부에서 석탄 연소 후 발생하는 회분(fly ash particle) 특성은 연소 되는 동안 석탄에 포함되어 있는 minerals 의 물리적 및 화학적 변화에 의하여 결정되어 진다. 일반적으로 회분의 일부는 용해상태(molten phase)로, 일부는 부분용해상태(partially fused)로, 그리고 나머지는 고체입자 상태로 노를 빠져나가게 된다. 노를 빠져 나온 회분은 관성(inertial impaction), thermophoresis, 응축 및 난류확산 등에 의하여 배연가스를 따라 튜브 표면으로 이동된다.⁽³⁾ 이렇게 회분이 열교환 튜브 표면에 부딪히는 경우 용해상태 및 부분용해상태의 입자처럼 충분한 점착성을 가지고 있는 회분은 그 표면에 달라붙게 된다. 대개 점착성이 없는 고체상태의 회분은 열교환 튜브 표면이나 점착표면(deposit surface)에 부딪힌 후에 뒤어 나오는데, 점착표면이 충분한 점착력을 가지는 경우에는 점착표면에 부착되기도 한다.

수 많은 연구자들이 지난 50 년간 회분의 열교환 튜브 표면에 점착되는 비율을 계산하기 위한 시도를 해오고 있다. 그러나 현재까지 오직 몇몇 이론적인 모델들만이 제시되었다. 이는 다음과 같은 두 가지 원인 때문이다: 첫째는 보일러 튜브 관군(tube banks)의 복잡한 기하학적 형상 때문에 이론 적으로 배연가스 속에 포함되어 운반되는 회분의 유동을 예측하기 어려웠으며, 둘째로는 점착율에 가장 큰 영향을 미치는 회분의 점착계수(sticking probability)는 아주 다양한 변수들에 의하여 영향을 받기 때문에 결정하기가 매우 어렵다. 위에서 언급된 첫번째 어려움은 컴퓨터를 이용한 수치적 해석에 의하여 해결되고 있다. 실제로 각종 산업에서 발생하는 기체-고체입자 2 상유동(gas-solid two-phase flow) 문제는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 성공적으로 해결되고 있다. 그러나 두 번째 어려움을 해결하기 위해서는 아직 더 많은 연구가 요구되고 있다.

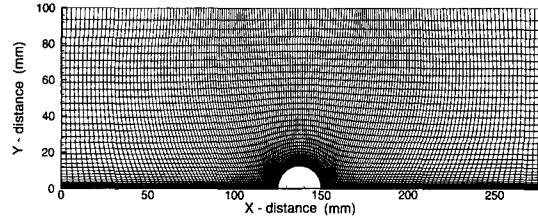


Fig. 1 Grid system for a single tube flow (161×36)

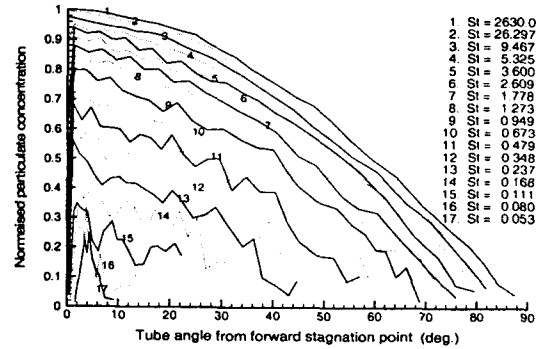


Fig. 2 Normalized particulate concentration

2. 단일 관에 대한 입자유동해석

본 연구에서는 가스 상에 대해서는 연속체 모델을, 입자에 대해서는 비연속 방법을 이용하는 Lagrangian 방법을 이용하여 2 상유동을 해석하였다. 이를 위해 범용 상용코드인 FLUENT 를 사용하였다. 가스유동에 대한 난류해석을 위하여 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

균일한 입자유동을 가지는 단일 관은 발전용 보일러의 파울링 해석에 많이 이용되어지고 있다. 이는 단일관 유동이 파울링이 가장 심한 관군의 첫번째 줄에 위치한 튜브에 대한 유동조건을 거의 유사하게 모사하기 때문이다. Figure 1 에 가스-입자유동해석을 위한 격자계를 나타내었다. 입구 경계 조건 및 물리적 변수들은 실험결과와 비교하기 위하여 실험조건⁽⁴⁾과 동일하게 사용하였다.

단일 관 주위에서의 입자농도(particulate concentration) 분포는 원주 방향으로 파울링 두께에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 입자농도에 대한 가장 적당한 정의는 단위시간에 단위면적에 충돌하는 입자의 개수이다. 이는 입자에 작용하는 각종 힘에 의하여 단일 입자에 대한 궤적을 계산하는 Lagrangian 방법을 이용하면 쉽게 구할 수 있다. Figure 2 에 입구에서 균일 입자농도를 가지는 단일 관에서의 입자농도가 나타나 있다. 여기서 St 는 입자의 스토크스 수를 의미하며, 입자농도는

입구에서의 입자농도를 이용하여 단위화 시켰다. 이 그림에서 입자농도는 앞전 정체점에서 가장 크고 각이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 이 그림에 나타난 입자거동은 많은 연구자들⁽⁵⁻⁷⁾에 의하여 조사된 결과와 거의 같다.

입자의 충돌속도 및 충돌각은 입자가 충돌하는 동안에 발생하는 입자의 운동에너지 손실을 계산하는 중요한 변수이기 때문에 충돌입자의 점착계수(sticking probability)를 계산하는데 필수적으로 사용되어 진다. Figure 3은 다양한 입자 크기에 대한 관 주위에서의 충돌속도를 나타낸다. 충돌속도 역시 입구에서의 입자 속도를 이용하여 단위화 시켰다. 이 그림에서 앞전 정체점에서의 입자 충돌속도는 입자의 스토크스 수가 작아질수록 작아짐을 알 수 있다. 또한 크기가 작은 입자들은 공기의 가속에 의하여 충돌속도가 급격히 증가되지만 크기가 큰 입자들은 큰 관성력으로 인하여 초기의 속도를 그대로 유지함을 알 수 있다.

Figure 4는 관 주위에서의 입자의 충돌각을 보여주고 있다. 이 그림에서 앞전 정체점에서는 입자들이 수직으로 충돌하며, 그 충돌각은 관의 각도가 증가할수록 작아짐을 알 수 있다.

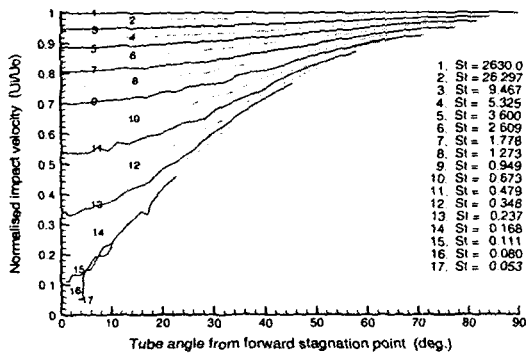


Fig. 3 Normalized impact velocity along the tube surface

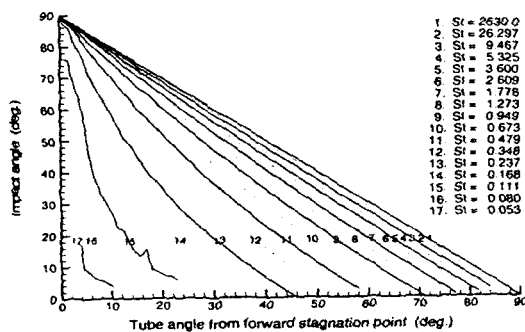


Fig. 4 Impact angle around a tube

3. 표면코팅입자에 의한 파울링 생성

3.1 표면코팅입자 생성

석탄에 포함되어 있는 Na, K, Pb, Zn 및 Be와 같은 무기성분은 석탄 연소 중에 휘발되어 찌다가 보일러 내부 하류에서 온도가 낮아져 이슬점에 도달하면 응축되기 시작한다. 이들은 다음과 같이 세 가지 형태로 응축되는데 이들 모두 파울링 형성에 매우 중요하다.

(1) 일부분은 균일하게 응축되어 1 마이크로 이하의 에어로졸⁽⁸⁾이 되어 thermophoretic force에 의하여 열교환 표면에 정착되게 된다.⁽³⁾ 이런 초미세 입자의 양은 연소온도가 높아질수록 증가한다.^(9,10)

(2) 일부분은 비교적 큰 회분 표면에 비균일하게 응축된다. 이것은 회분 표면이 전체 회분에 비해서 더 높은 휘발성분을 가진다는 사실로부터 알 수 있다.^(11,12) 충돌입자의 표면에 유체 막이 형성되어 있는 경우 입자가 가지고 있는 초기의 운동에너지는 충돌 시 점성효과에 의하여 크게 손실되어진다. 또한 유체 막의 점성효과는 충돌입자가 뒤 돌아 나가는 것을 막아줄 수 있기 때문에 파울링 형성을 급격히 진전시킨다. 더욱이 이런 유체 막은 마치 아교(glue)처럼 작용하여 정착되어 있는 입자들을 서로 연결시켜주고 온도가 낮아지는 경우 소결(sintering)되어 파울링의 부착강도를 크게 증가시킨다. 따라서 휘발성분의 응축은 강력한 고착 파울링 형성에 매우 중요한 요소로 작용한다.

(3) 휘발된 무기성분 가운데 일부분은 파울링 표면에 응축되어진다. 이 경우 파울링 표면의 점착계수가 커져서 표면코팅이 되지 않은 일반 입자들도 정착되어질 수 있기 때문에 파울링이 심해질 수 있다.

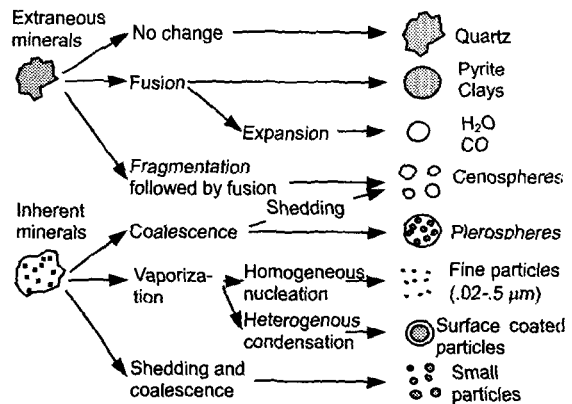


Fig. 5 Schematic diagram for ash production during combustion

Figure 5 에 회분 형성에 대한 메커니즘을 나타내었다. 일반적으로 큰 회분은 병합(coalescence)에 의하여 형성되는 반면에 크기가 작은 회분과 표면 코팅입자 들은 휘발성 무기성분의 기화 및 그 후의 응축에 의하여 형성된다.

3.2 입자의 점착층 두께 결정

휘발성 알칼리 성분인 나트륨(Na; sodium)은 고착 파울링 형성에 가장 큰 역할을 한다. 석탄 연소 중의 나트륨 거동과 표면코팅입자 형성에 관한 근본적인 개념은 Walsh et al. (13)에 의하여 자세히 검토되어 졌다. 본 연구에서는 황산나트륨(sodium sulfate)의 응축에 의해 형성되는 회분 표면의 점착층(sticky layer) 두께를 결정하기 위하여 Walsh et al. (13)이 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\delta_p = Y_{Na_2SO_4} \frac{W_{Na_2SO_4}}{W_{Na_2O}} \frac{\dot{\rho}_p}{\dot{\rho}_{Na_2SO_4}} \frac{< d_p >_s^2}{6d_p} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\dot{\rho}_p < d_p >_s^2}{6Sh_p D_{Na_2SO_4} \rho_p} \quad (2)$$

3.3 표면코팅입자가 깨끗한 관 표면에 충돌할 때의 입자 운동

입자가 물체의 표면에 충돌하는 경우 소성변형에 의하여 충돌입자의 운동에너지가 소산된다. 고체입자 충돌의 경우 대개 소성변형에 의하여 소산되는 에너지는 충돌 이전의 입자의 운동에너지에 비하여 훨씬 작다. 이런 경우 충돌입자는 물체 표면으로부터 되 튕겨 나가게 된다. 그러나 표면코팅입자가 충돌하는 경우 입자의 고체 면이 물체 표면에 부딪지기 이전에 점착층의 점성효과와 경사충돌의 경우 마찰력에 의하여 충돌입자의 속도가 작아지게 된다 (Fig. 6 참조). 충돌입자는 이렇게 속도가 작아진 상태에서 충돌하고 소성변형에 의하여 운동에너지를 잃게 된다. 입자가 충돌하는 동안 입자는 회전운동을 할 수 있다. 그러나 입자의 회전운동 효과는 본 연구에서 제외되었다. 입자의 고체표면 충돌 이후에 반사입자(reflected particle)의 운동에너지가 입자와 물체표면 사이에 작용하는 점성에너지 보다 큰 경우 그 입자는 물체표면으로부터 이탈할 것이고, 작은 경우에는 물체표면에 점착되어 파울링이 형성되게 된다. 따라서 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\xi = \frac{2\gamma A}{\frac{1}{2} m_p (u_p^r)^2} \quad (3)$$

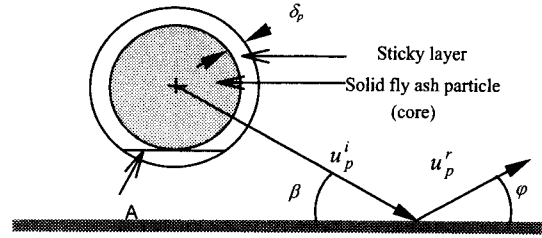


Fig. 6 Schematic diagram for particle dynamics

따라서 식 (3)에서 점착계수(ξ)가 1 이상인 경우 입자는 물체표면에 점착되게 된다.

반사입자의 속도를 구하기 위하여 우선 표면코팅입자의 고체표면 충돌속도를 구해야 한다. 에너지 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\frac{1}{2} m_p (u_p^i)^2 = \frac{1}{2} m_p (u_p^{ci})^2 + DE \quad (4)$$

$$DE = \dot{\rho}_{Na_2SO_4} (u_p^i)^2 A \delta_p \sin^2 \beta \left(1 + \frac{\mu}{\tan \beta}\right) \quad (5)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$u_p^{ci} = u_p^i \left\{ 1 - \frac{12 \dot{\rho}_{Na_2SO_4} \delta_p^2 \sin^2 \beta (1 + \mu / \tan \beta)}{\dot{\rho}_p d_p^2} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

반사입자 속도는 충돌속도에 반발계수(coefficient of restitution)를 곱하여 구할 수 있다. Tabakoff 와 Malak (14)은 레이저-도플러 속도계(laser-Doppler velocimetry)를 이용하여 충돌각에 대한 함수로서 회분의 반발계수를 구하였다. 본 연구에서는 이들의 실험결과를 이용하여 반사입자의 속도를 계산하였다. 결과적으로 반사입자의 속도는 다음과 같이 구해진다.

$$u_p^r = e_v u_p^i \left\{ 1 - \frac{12 \dot{\rho}_{Na_2SO_4} \delta_p^2 \sin^2 \beta (1 + \mu / \tan \beta)}{\dot{\rho}_p d_p^2} \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$u_p^r = 1 \times 10^{-10} \quad (\text{if } u_p^r \leq 0)$$

식 (7)에 나와 있는 반발계수에 대한 수학적 표현은 참고문헌(15)에 나와있다. 물리적으로 반사입자 속도는 0 보다 작을 수 없다. 그러나 식 (7)은 점성효과에 의한 에너지가 입자의 운동에너지보다 큰 경우에 음의 값을 나타낼 수 있다. 이를 방지하기 위하여 음의 속도는 아주 작은 값을 이용하였다.

3.4 표면코팅입자가 파울링 표면에 충돌할 때의 입자 운동

황산나트륨은 파울링 표면에도 직접적으로 응축되어 점착층을 형성시킨다. 그러나 실질적으로 파울링 표면은 그 표면에 부착되어지는 입사입자(incident particle)에 노출되어 있다. 따라서 파울링 표면의 점착층 특성은 파울링 표면으로의 황산나트륨 직접응축 뿐만이 아니라 동일 지점에서 바로 전에 부착된 입자와 충돌하는 입자의 시간 간격이 파울링 표면에서의 황산나트륨 응축에 대한 특성 시간보다 짧은 경우 새로이 부착되는 입자의 점착층에 의해서 주로 결정된다. 이런 사항을 반영하기 위하여 본 연구에서는 파울링 표면의 점착층 두께는 회분 평균입경의 반(1/2)에 해당하는 크기의 회분이 가지는 점착층 두께와 같다고 가정하였다. 따라서 파울링 표면 점착층 두께는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\delta_s = Y_{Na_2SO_4} \frac{W_{Na_2SO_4}}{W_{Na_2O}} \frac{\dot{\rho}_p}{\dot{\rho}_{Na_2SO_4}} \frac{<d_p>^2}{3d_m} [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (8)$$

충돌입자의 운동에너지 손실은 파울링 표면의 점착층 두께가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 따라서 식 (4)는 다음과 같은 형태로 확장되어질 수 있다.

$$u_p^r = e_p u_p^i \left\{ 1 - \frac{12 \rho_{Na_2SO_4} (\delta_p + \delta_s)^2 \sin^2 \beta (1 + \mu / \tan \beta)}{\rho_p d_p^2} \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$u_p^r = 1 \times 10^{-10} \quad (\text{if } u_p^r \leq 0)$$

3.5 입자-파울링 표면 충돌 모델링

파울링 형성 과정은 파울링 표면의 물리적 특성, 즉 초기에는 표면이 깨끗한 관 표면 그리고 그 이후에는 파울링 바깥 층에 의하여 큰 영향을 받는다. 일반적으로 기존 파울링 표면에서 일어나는 현상은 깨끗한 표면을 가지는 관 표면에서 발생하는 현상 보다 훨씬 복잡한데, 이는 파울링 표면에서의 황산나트륨 응축 및 점착된 입자들의 소결 등에 의하여 파울링 표면이 불규칙하게 성장하기 때문이다.

입자의 크기가 10 μ m 보다 큰 경우 입자의 운동에너지 손실은 주로 입자-파울링 표면 충돌에 의해서 결정된다. 따라서 파울링 성장률을 계산하기 위해서는 입자 충돌 과정에 대한 상세한 모델링이 요구된다. 일반적으로 파울링 표면은 다양한 크기를 가지는 입자들의 조합으로 되어있기 때문에 상당히 불규칙한 구조를 가진다. 따라서 충돌입자의 운동에너지 손실을 정확히 계산하기 위해서 파울링 표면의 미세구조(microstructure)를 고려해야 한다. 그러나 대부분의 연구에 있어서 파울링 표면

의 미세구조는 파울링 표면과 충돌입자 사이에 일어나는 현상이 매우 복잡한 관계로 무시되어오고 있다. 따라서 파울링 표면의 미세구조를 반영한 해석은 아직도 개척해야 될 연구분야로 남아있는 상태이다. Tassopoulos et al.⁽¹⁶⁾은 미세구조를 반영하여 파울링 해석을 시도하였는데 이 것이 파울링 표면의 미세구조를 반영하여 해석한 거의 유일한 결과이다.

아주 큰 입자가 벽에 충돌하는 경우 벽의 거칠기가 아주 작은 경우 통상적으로 벽의 거칠기는 무시된다. 그러나 벽 거칠기에 대한 특성길이보다 작은 입경을 가지는 입자가 충돌하는 경우 벽의 거칠기는 입자의 충돌에 큰 영향을 미치게 된다. 입자-거친 벽 충돌에 대한 모델은 Matsumoto 와 Saito⁽¹⁷⁾에 의하여 제안되었으며, 후에 Sommerfeld⁽¹⁸⁾에 의하여 개선되어 졌다. 그러나 그들은 입자의 불규칙 되 튀김만을 고려하였으며 파울링 성장에 가장 중요한 변수 가운데 하나인 다중충돌(multiple impaction)은 무시하였는데, 이는 그들은 벽이 지배하는 공기-입자 유동에서 오직 반사입자의 운동에만 관심을 두었기 때문이다.

회분에 의한 파울링을 수치적으로 해석하기 위해서는 파울링 표면의 거칠기(미세구조)를 포함하는 입자-파울링 표면 충돌에 대한 상세한 모델링이 요구된다. Figure 7에 나타나 있는 것처럼, 파울링 표면 거칠기에 대한 특성길이보다 작은 입경을 가지는 입자가 충돌하는 경우 다중충돌이 일어날 수 있다. 파울링 표면 거칠기에 대한 특성길이보다 큰 입경을 가지는 입자의 경우에도 다중충돌이 일어날 수 있으나 초기의 충돌 강도가 후에 일어나는 충돌에 대한 강도보다 훨씬 크기 때문에 단일 충돌로 가정할 수 있다.

파울링 표면 거칠기에 대한 특성길이보다 작은 입경을 가지는 입자는 3 중충돌까지 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 최대 충돌 수를 2 로 가정하였다. 이는 작은 입자의 경우 세 번째 충돌이 일어나는 경우 충돌각이 아주 작을 것으로 판단되며, 또한 작은 입자의 경우 대

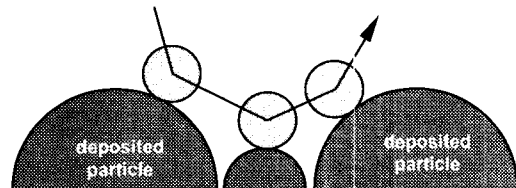


Fig. 7 Schematic diagram for particle-rough wall collisions for a small particle

개 세 번째 충돌 이전에 파울링 표면에 부착되기 때문이다.

두 번째 충돌에 대한 입자의 충돌각 계산은 매우 복잡하며 통계적 분포를 가질 것으로 판단된다. 왜냐하면 입자 충돌은 입자 형상, 파울링 표면의 미세구조 및 입자의 반발계수를 포함한 입자의 특성에 의하여 영향을 받기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 식을 이용하여 계산을 단순화 시켰다.

$$\beta_2 = \alpha\varphi \tag{10}$$

여기서 α 는 상수, φ 는 입자 첫번째 충돌에 대한 반사각을 의미한다.

4. 파울링 성장률

대부분의 입자는 입자가 가지는 관성력에 의하여 가스 유선으로부터 이탈하여 열교환 표면으로 이동되기 때문에 입자의 관성충돌은 파울링 형성에 가장 중요한 메커니즘이다.⁽¹⁹⁾ 단일 관에 대한 입자의 충돌은 잘 밝혀져 있으며, 많은 연구자들⁽²⁰⁻²²⁾에 의하여 관 표면에 충돌하는 입자의 개수에 대한 자유 흐름에서 관과 충돌이 예상되는 입자의 개수에 대한 비로 정의되는 충돌확률 (impact probability)이 많이 연구되고 있다.

충돌 입자량은 각각의 크기를 가지는 입자량과 충돌확률을 곱하여 계산된다. 그러므로 파울링 성장률은 다음과 같은 식에 의하여 구해질 수 있다.

$$\Phi_d = \sum_{j=1}^n (IP_j \cdot FP_j \cdot \xi) \tag{11}$$

여기서 하첨자 j 는 각각의 입자 크기를 의미한다.

5. 계산결과 및 검토

MIT(Massachusetts Institute of Technology) 연구그룹은 파울링 성장률을 조사하기 위하여 다양한 석탄을 이용하여 광범위한 실험을 수행하였다.^(4,23) 본 연구를 통하여 개발된 파울링 모델을 검증하기 위하여 그들의 실험결과와 계산결과를 비교하였다.

충돌확률의 정확성을 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였으며, Fig. 8 에 다양한 레이놀즈 수와 스토크스 수(St)에 대한 충돌확률을 나타내었다. 이 결과는 선행 연구자들⁽²⁰⁻²²⁾의 결과와 거의 동일함을 확인하였다. Fig. 9 에 점착계수가 1인 경우에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 이 그림에서 수치해석 결과는 Loehden의 충돌모델⁽⁴⁾과 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서 밝혀줄

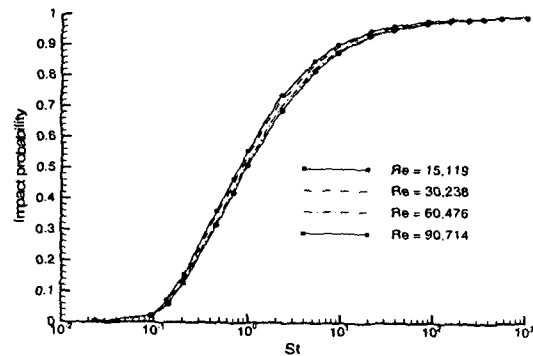


Fig. 8 Impact probabilities for a tube as a function of Reynolds number and Stokes number

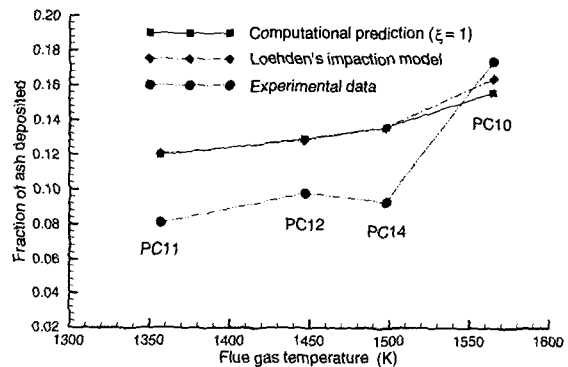


Fig. 9 Comparison of computational results with experimental data

것은 실험 번호 PC10의 경우 액체상태의 입자에 의하여 형성되는 슬래깅(slugging)이며, 나머지 PC11, 12, 14는 파울링이라는 것이다. 이는 연구자들의 실험적 관찰에 의하여 확인된 사실이다. 따라서 PC11, 12, 14의 경우 파울링 표면에 충돌한 입자의 일부분은 그 표면에 부착되지 않고 되튀어 나갔다는 사실을 알 수 있다.

MIT 연구진⁽⁴⁾은 높은 나트륨 함량을 가지는 갈탄을 이용하여 파울링 형성을 연구하였다. 실험에 사용된 갈탄은 미국 Decker 탄으로 회분에 무게로 5.35%의 Na_2O 를 함유하고 있는데, 이는 나트륨이 다른 탄에 비하여 매우 많이 포함되어 있는 편이다. 따라서 이 탄을 이용하여 황산나트륨으로 코팅된 입자의 점착계수를 계산하였다. Figure 10에 MIT 실험 PC23에 사용된 조건을 이용하여 깨끗한 관 표면에 충돌하는 황산나트륨 코팅입자의 충돌확률을 나타내었다. 이 그림에서 입경이 $9\mu m$ 인 입자의 경우 충돌각이 40° 보다 크면 그 입자는 표면에 부착된다는 것을 알 수 있다. 반면에 입경이 $10\mu m$ 이상인 경우 충돌입자는 부착되지 않고 되튀어 나간다는 것을 알 수 있다. Jackson⁽²⁴⁾의 연구결과에 의하면 대부분의 깨끗한

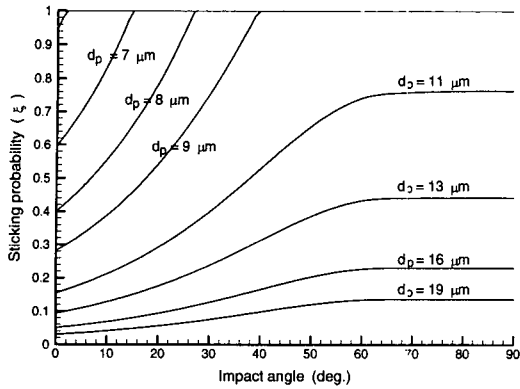


Fig. 10 Sticking probabilities of sodium sulfate-coated particles colliding with a clean tube surface

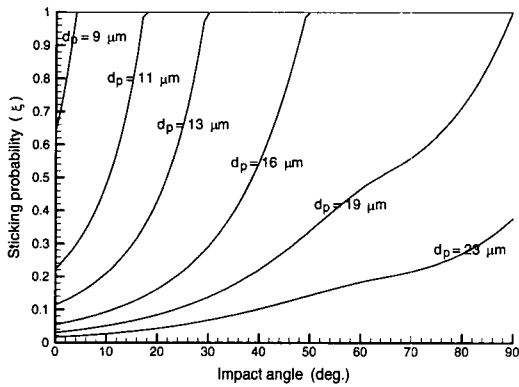


Fig. 11 Sticking probabilities of sodium sulfate-coated particles colliding with a deposit surface

관 표면에는 미세한 입자(fine-grained particles)가 약하게 부착되어 흰색 층(pale-colored layer)을 이룬다. 그는 또한 이 층은 주로 나트륨이 많이 포함되고 크기가 10μm 보다 작은 입자로 구성되어 있다는 것을 지적하였다. 또한 이 사실은 다른 많은 연구자들⁽²⁵⁻²⁸⁾에 의하여 확인 되었다. 따라서 파울링 생성 초기 단계에 있어서 깨끗한 관 표면에는 입경이 10μm 보다 작은 입자만이 부착된다는 수치해석 결과는 실제적으로 발전용 보일러에서 일어나는 현상과 일치함을 알 수 있다.

Figure 11 에 파울링 표면에 충돌하는 황산나트륨 코팅입자의 점착계수를 나타내었다. 일반적으로 반발계수는 통계적 분포를 가지기 때문에 식 (10)에 나와 있는 상수 α에 대한 값으로 0.5 를 사용하였다. 이 그림으로부터 다중충돌(본 연구에서는 2 중충돌)이 일어나는 경우 깨끗한 관 표면에서 일어나는 단일충돌에 비하여 점착계수가 더 큰 값을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 입경이 19μm 보다 큰 입자는 충돌 후에 되 튀어 나간다는 것을 알 수 있다.

Figure 12 에 황산나트륨 코팅입자에 의한 파울링과 액체상태의 입자에 의한 슬래깅에 대한 실험

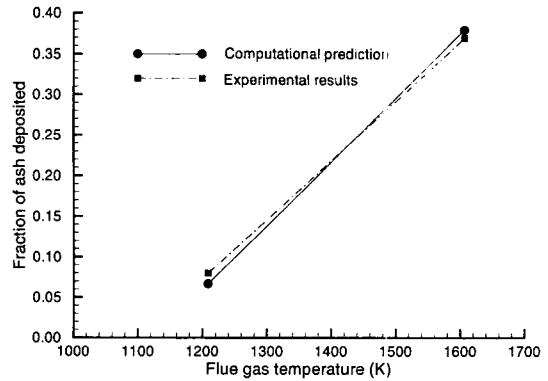


Fig. 12 Comparison of computational prediction with experimental results

결과⁽⁴⁾와 수치해석 결과를 비교하였다. 이 그림으로부터 본 연구에서 개발된 다중충돌 모델은 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

6. 결론

파울링 성장률 계산을 위하여 개발된 모델을 수치해석 결과와 실험 데이터를 비교하여 검증하였다. 충돌입자의 점착계수는 점성, 표면장력, 충돌속도, 충돌각 및 입자의 점착층 두께를 이용하여 계산하였다. 파울링 표면에 충돌하는 표면코팅 입자의 거동을 정확하게 반영하기 위하여 다중충돌 모델을 이용하였다.

본 연구에서 많은 양의 나트륨이 포함되어 있는 석탄을 이용하는 경우 초기 단계에 형성되는 파울링은 주로 10μm 이하의 입자로 구성된다는 것을 수치해석 방법을 통하여 확인하였으며, 이 결과는 실제로 발전용 보일러에서 발생하는 현상과 거의 일치한다. 파울링 두께가 증가함에 따라 부착되는 입자의 크기도 증가하는데 이런 현상은 다중충돌 모델을 이용하면 수치적으로 해석할 수 있다. 결론적으로 표면코팅입자에 의한 파울링을 해석하기 위해서는 충돌입자 뿐만이 아니라 파울링 표면의 점착계수도 고려해야 하며, 다중충돌 모델을 적용하면 파울링 성장률을 비교적 정확하게 구할 수 있다.

참고문헌

(1) Sondreal, E. A., Tuft, P. H. and Beckering, W., 1977, "Ash Fouling in the Combustion of Low Rank Western U. S. Coals." *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 16.

- pp. 95~110.
- (2) Bryers, R. W., 1996, "Fire Side Slagging, Fouling, and High-Temperature Corrosion of Heat-Transfer Surface due to Impurities in Steam-Raising Fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 22, pp. 29~120.
 - (3) Baxter, L. L. and DeSollar, R. W., 1993, "A Mechanistic Description of Ash Deposition during Pulverized Coal Combustion: Predictions Compared with Observations," *Fuel*, Vol. 72, pp. 1411~1418.
 - (4) Loehden, D., 1988, "The Formation of Fouling and Slagging Deposits in Pulverized Coal Combustion," *ME Thesis, MIT*.
 - (5) Fan, J., Zhou, D., Jin, J. and Cen, K., 1991, "Numerical Simulation of Tube Erosion by Particle Impaction," *Wear*, Vol. 142, pp. 171~184.
 - (6) Schuh, M. J., Schuler, C. A. and Humphrey, J. A. C., 1989, "Numerical Calculation of Particle-Laden Gas Flows Past Tubes," *AIChE J.*, Vol. 35, No. 3, pp. 466~480.
 - (7) Schweitzer, M. O. and Humphrey, J. A. C., 1988, "Note on Experimental Measurement of Particles Embedded in One and Two In-line Tubes in a High Speed Gas Stream," *Wear*, Vol. 126, pp. 211~218.
 - (8) Neville, M. and Sarofim, A. F., 1985, "The Fate of Sodium during Pulverized Coal Combustion," *Fuel*, Vol. 64, pp. 384~390.
 - (9) Erickson, T. A., Ludlow, D. K. and Benson, S. A., 1991, "Interaction of Sodium, Sulfur, and Silica during Coal Combustion," *Energy & Fuels*, Vol. 5, pp. 539~547.
 - (10) Quann, R. J., Neville, M., Janghorbanl, M., Mims, C. A. and Sarofim, A. F., 1982, "Mineral Matter and Trace Element Vaporization in a Laboratory-Pulverized Coal Combustion System," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 16, pp. 776~781.
 - (11) Raask, E. and Goetz, L., 1981, "Characteristics of Captured Ash, Chimney Solids and Trace Elements," *J. Inst. Energy*, pp. 163~173.
 - (12) Mims, C. A., Neville, M., Quann, R. J., House, K. and Sarofim, A. F., 1980, "Laboratory Studies of Mineral Matter Vaporization during Coal Combustion," *AIChE Symp. Series*, Vol. 76, pp. 188~194.
 - (13) Walsh, P. M., Sarofim, A. F. and Beer, J. M., 1992, "Fouling of Convection Heat Exchangers by Lignitic Coal Ash," *Energy & Fuels*, Vol. 6, pp. 709~715.
 - (14) Tabakoff, W., and Malak, M. F., 1987, "Laser Measurements of Fly Ash Rebound Parameters for Use in Trajectory Calculations," *J. Turbomachinery*, Vol. 109, pp. 535~540.
 - (15) Lee, B. E., 1997, "Computational Prediction of Deposition and Erosion in Boiler Tube Banks" *PhD Thesis, The University of New South Wales*.
 - (16) Tassopoulos, M., O'Brien, J. A. and Rosner, D. E., 1989, "Simulation of Microstructure / Mechanism Relationships in Particle Deposition," *AIChE J.*, Vol. 35, No. 6, pp. 967~980.
 - (17) Matsumoto, S. and Saito, S., 1970, "On the Mechanism of Suspension of Particles in Horizontal Pneumatic Conveying: Monte Carlo Simulation Based on the Irregular Bounding Model," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 3, No. 1, pp. 83~92.
 - (18) Sommerfeld, M., 1992, "Modelling of Particle-Wall Collisions in Confined Gas-Particle Flows," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 18, pp. 905~926.
 - (19) Osborn, G. A., 1992, "Review of Sulphur and Chlorine Retention in Coal-Fired Boiler Deposits," *Fuel*, Vol. 71, pp. 131~142.
 - (20) Rosner, D. E., Gokoglu, S. A. and Israel, R., 1982, "Rational Engineering Correlations of Diffusional and Inertial Particle Deposition Behavior in Non-Isothermal Forced Convection Environments," *Proc. Engineering Foundation Conference: Pennsylvania*, pp. 235~256.
 - (21) Israel, R. and Rosner, D. E., 1983, "Use of a Generalized Stokes Number to Determine the Aerodynamic Capture Efficiency of Non-Stokesian Particles from a Compressible Gas Flow," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 2, pp. 45~51.
 - (22) Ilias, S. and Douglas, P. L., 1989, "Inertial Impaction of Aerosol Particles on Cylinders at Intermediate and High Reynolds Numbers," *Chemical Engineering Science*, Vol. 44, No. 1, pp. 81~99.
 - (23) Walsh, P. M., Sayre, A. N., Loehden, D. O., Monroe, L. S., Beer, J. M. and Sarofim, A. F., "Deposition of Bituminous Coal Ash on an Isolated Heat Exchanger Tube: Effects of Coal Properties on Deposition Growth," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 16, pp. 327~346.
 - (24) Jackson, P. J., 1978, "Deposition of Inorganic Material in Oil-Fired Boilers," *Ash Deposits and Corrosion due to Impurities in Combustion Gases, Hemisphere Pub. Co.*, pp. 147~161.
 - (25) Borio, R. W., Plumley, A. L. and Sylvester, W. R., 1977, "Control of High-Temperature Metal Wastage in Pulverized Coal-Fired Steam Generators," *Combustion Engineering Publ. TIS-5055*.
 - (26) Borio, R. W., Goetz, G. J. and Levasseur, A. A., 1977, "Slagging and Fouling Properties of Coal Ash Deposits as Determined in a Laboratory Test Facility," *ASME Paper No. 77-WA/Fu-6*.
 - (27) Sondreal, E. A., Gronhovd, G. H., Tufte, P. H. and Beckering, W., 1978, "Ash Fouling Studies of Low-Rank Western U.S. Coals," *Ash Deposits and Corrosion due to Impurities in Combustion Gases, Hemisphere Pub. Co.*, pp. 85~111.
 - (28) Tufte, P. H. and Beckering, W., 1975, "A Proposed Mechanism for Ash Fouling Burning Northern Great Plains Lignite," *ASME Paper No. 74-WA/CD-3*.