

Vortex에 의한 DSI공정 중 혼합효율 향상에 관한 연구

정진도* · 김장우†

A Numerical Study of SO₂ Efficiency Improvement in the DSI process of FGD

J. D. Chung and J. W. Kim

Key Words: Vortex generator(와류발생기), Dry desulfurization(건식탈황), 2-phase flow(2상유동), Numerical simulation(수치해석)

Abstract

This study carried out numerical analysis of flow field of combustion gas and sorbent to test sorbent efficiency of DSI process. To provide rapid mixing for increase utilization rate of sorbent, streamwise vorticity can be introduced into the flowing streams by other means; for example, by installing vortex generators immediately downstream of the wavy trailing edge. Computing results show that the degree of sorbent dispersion depends strongly on duct structure. Highest dispersion efficiency received when vortex generator was installed inside of duct. The results presented in this study a optimum condition for the development of practical DSI process.

1. 서 론

화석을 연료로 사용하는 화력 발전소는 심각한 대기 오염물질 배출 원인으로 질소산화물과 더불어 황산화물의 주 발생 원인으로 인식 되고 있다. 이처럼 심각한 오염물질 배출원인 발전시설 중 몇몇 발전소는 별도의 탈황 시설 없이 저 유황탄을 연료로 사용하여 국내의 환경기준을 만족하고 있다. 하지만 우리나라의 경우 저 유황탄의 자체 보급률이 에너지 수요를 만족하기에는 부족하여 황 함유량이 낮고 연소효율이 좋은 역청탄을 수입하여 발전원으로 사용해 왔다. 하지만 현재 역청탄의 수급이 점점 어려워지고 있고 가격 또한 상승하여 비교적 황 함유량이 높지만 경제적이며 수급이 용이한 아역청

탄의 수입을 증가시키고 있는 실정이다. 이와 같이 운영비 절감과 수급의 용이성을 위하여 황 함유량이 높은 석탄을 연소시킬 경우 오염물질 배출규제에 부합하기 위하여 화석연료를 사용하는 발전소에서는 기존의 장치에 추가적인 배연 탈황 공정(FGD; flue gas desulfurization)이 요구된다⁽¹⁾. 현재 개발된 대부분의 배연 탈황 공정은 습식탈황공정과 건식탈황공정으로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 설비의 개조가 용이하고 설치비용이 저렴하며 탈황설비의 운영비가 저렴한 건식탈황공정 중 DSI(dry sorbent injection) 공법에 대해 논의한다⁽²⁾. 하지만 이 공법은 황산화물과 탈황제 역할을 하는 소석회의 낮은 접촉율과 짧은 반응시간으로 탈황효율이 습식탈황 방식에 비해 낮은 단점이 있다. 따라서 이 논문에서는 이를 해결하기 위하여 덕트 내 배연가스와 소석회의 혼합을 돕는 vortex generator를 채용하여 수치해석적 방법을 통해 혼합효과를 검증하였다.

(2008년 9월 28일 접수 ~ 2009년 2월 17일 심사완료)

*호서대학교 환경공학과

† 호서대학교 디스플레이 공학부

E-mail : jwkim@hoseo.edu

TEL : (041)540-5925 FAX : (041)540-5929

2. 수치해석

2.1 계산영역

덕트는 형상은 사각 덕트로서 화력 발전소(N화력 S 발전 본부)의 덕트 형상과 유사하도록 구성하였다.

덕트 내 유속을 1 m/s로 고정하여 소석회와 SO₂의 반응이 최대 4초 이상 반응할 수 있도록 Fig. 1과 같이 높이 1.8 m, 길이 3 m로 설정하여 덕트의 유효길이가 4.5 m 이상 되도록 하였다. 그리고 덕트 내에 설치된 vortex generator의 모식도는 Fig. 2의 (b)와 같이 시작은 직선으로 된 평판이며 길이 방향으로 진행할수록 일정한 주기와 연결되어진 기하학적 형상을 가진다⁽³⁾. 본 논문에서는 주기곡선의 마루와 골의 최대 길이가 85 mm, 폭 150 mm, 높이 200 mm인 vortex generator를 채용하여 이 장치가 소석회의 분산 및 혼합에 어떠한 영향을 미치는지

분석하였다.

Figure 2(a)는 입구로부터 250 mm 떨어진 위치에 설치된 vortex generator가 없는 사각 덕트로서 입구로 유입되는 기류는 덕트 내부 구조물로 인한 영향을 받지 않게 구성된 반면, Fig. 2(b)는 vortex generator를 설치하여 기류의 변화를 유도하도록 하였다.

2.2 수치해석 기법

3차원 rectangular coordinate에서 기체의 유동에 대한 일반 지배방정식은 텐서(tensor) 표현식으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

식(1)의 ϕ 는 일반종속변수, Γ 는 ϕ 에 대한 확산계수, S_ϕ 는 생성항을 나타낸다.⁽⁴⁾

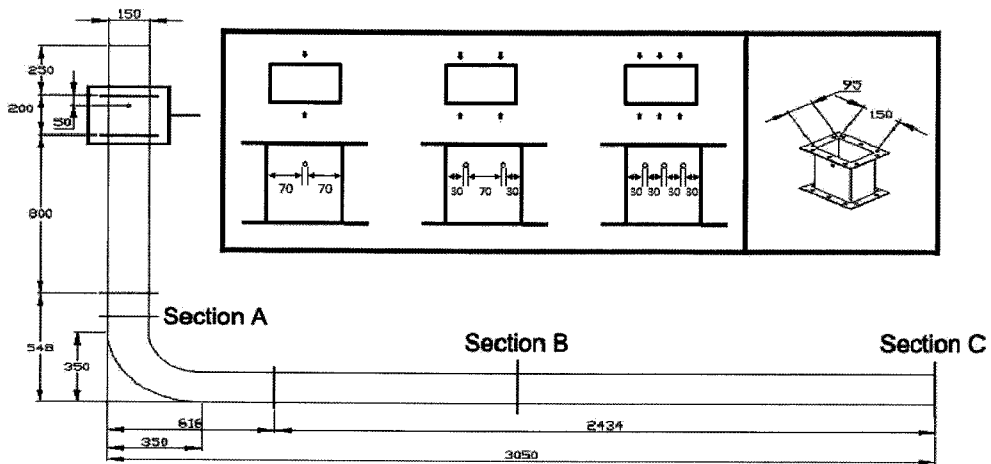
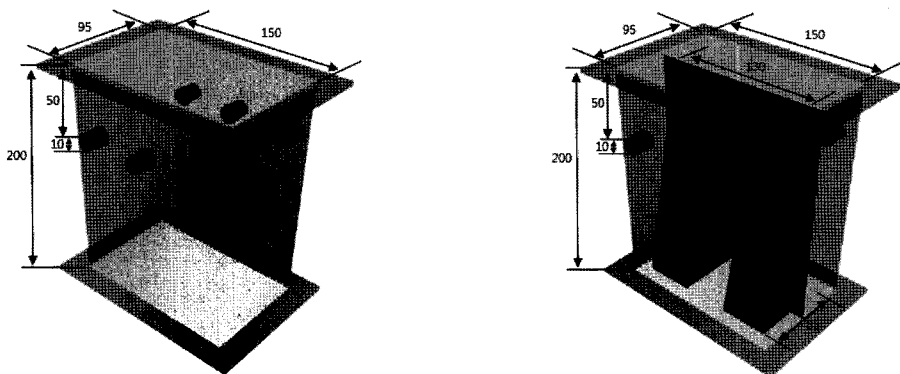


Fig. 1 Description of calculation domain (unit : mm)



(a) Not installed vortex generator (b) Installed vortex generator

Fig. 2 Configuration of vortex generator (unit : mm)

입자에 관련된 지배방정식은 운동량만을 고려하였고 온도를 해석하는 에너지 방정식은 본 연구에서 고려되지 않았다. 난류에서 입자의 운동을 모델링 할 때 문제 되는 것은 난류모델 및 난류 반응모델에서와 같이 난류 요동변속의 곱으로 나타나는 요동 상관 관계항(fluctuation correlation term) 이다. 본 연구에서는 입자와 유체 간의 정상상태의 항력(drag force)과 중력만을 고려하여 고체 입자의 운동방정식을 유도하고^(5, 6) 난류에서 평균을 취할 때 나타나는 요동 상관 관계항을 처리하기 위한 입자의 확산모델을 사용하였다. 여기서 입자의 운동방정식은 일반적인 식이므로 참고문헌으로 나타내었다. 또한, 본 논문에서는 급속한 흐름변화에 적용이 용이한 RNG(Renormalization-Group) κ - ϵ 모델을 사용하여 Reynolds 수에 의한 점성의 영향을 최소화하였고 난류 유동장을 해석하기 위해서는 속도 성분 u, v, w 에 대해 순간 운동방정식을 시간 평균한 값을 이용하였다⁽⁷⁾.

2.3 경계조건

Vortex generator의 유무와 소석회 분사구의 개수(2, 4, 6)에 따른 내부유동과 소석회 분산 성향을 분석하기 위하여 앞의 Fig. 1의 덕트 내부 영역에 대해 계산 격자를 생성하였다. 생성된 계산영역 중 중요 부분인 입구와 vortex generator 설치 부분의 그리드는 조밀하게 구성하여 계산에 대한 오차를 최소화 하였다. 계산에는 범용 CFD solver인 FLUENT⁽⁸⁾를 사용하였다.

계산에 적용된 경계조건은 다음과 같다. 덕트 입구에 공기가 일정유속(1 m/s)으로 유입되고 유입된 공기는 덕트 내를 이동하여 출구(대기압)로 배출되는 것으로 가정하였다 그리고 소석회 분사조건은 일정 유속(0.35 m/s)으로 화학적 양론비 Stoichiometry Ratio-SR3(5.58×10^{-6} kg/sec)의 소석회가 vortex generator 상단 2, 4, 6개의 분사구를 통하여 연속적으로 분사된다고 가정하였다 이 값은 황산화물과 소석회의 이론적 반응 몰비(1:1)를 이용하여 150 ppm으로 배출되는 황산화물을 현재 정부가 정하고 있는 환경 규제치 보다 낮은 100 ppm까지 저감시키기 위해 필요한 이론적 계산양보다 3배 많은 값이다.

3. 계산결과

화석연료를 발전원으로 사용하는 화력발전소의 보일러 후단 덕트에 소석회를 직접 분사하여 황산화물을 제거하는 공정인 DSI공법을 적용하기 위해서는 소석회와

배기가스와의 혼합정도를 향상시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서 수치해석은 vortex generator의 유무, 소석회 분사구의 개수 및 분사 위치에 따른 소석회의 덕트 내 분산 특성에 주안점을 두고 수행하였다.

3.1 입자의 궤적

Figure 3은 vortex generator의 유무 및 분사구의 개수(2, 4, 6개)에 따른 입자의 궤적을 나타내었다. 여기서 소석회는 평균입경이 0.5 μm , 비표면적이 40 m^2/g , 세공용적은 0.124 cm^3/g 이며 덕트 내의 온도는 25°C, 습도는 10%로 수행하였다.

Figure 3(a)는 vortex generator가 설치되지 않은 경우로서 덕트 내부에 분산되어진 소석회는 별다른 궤적의 변화 없이 곡관부분까지 이동한 후 곡관부분의 압력분포의 영향을 받아 궤적에 변화를 보인다. 그러나 vortex generator가 설치된 Fig. 3(b)의 경우는 분사구의 개수가 2개일 때를 제외하고는 vortex generator에 의한 기류교란의 영향으로 입자가 유동방향에 수직한 단면에 상대적으로 넓게 분포하여 유동하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 분사구의 개수조절 및 덕트 내 구조물의 설치를 통해 혼합촉진의 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 흡착제 분산성향

Figure 4는 덕트 위치별 분산성향을 파악하기 위해 소

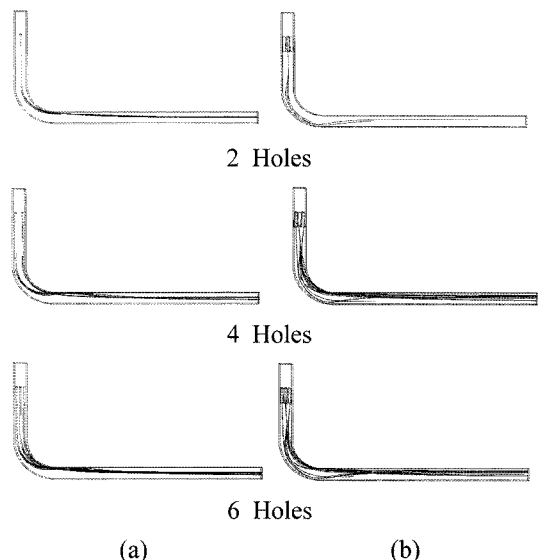


Fig. 3 Comparison with particle trajectory; (a) without vortex generator, (b) with vortex generator

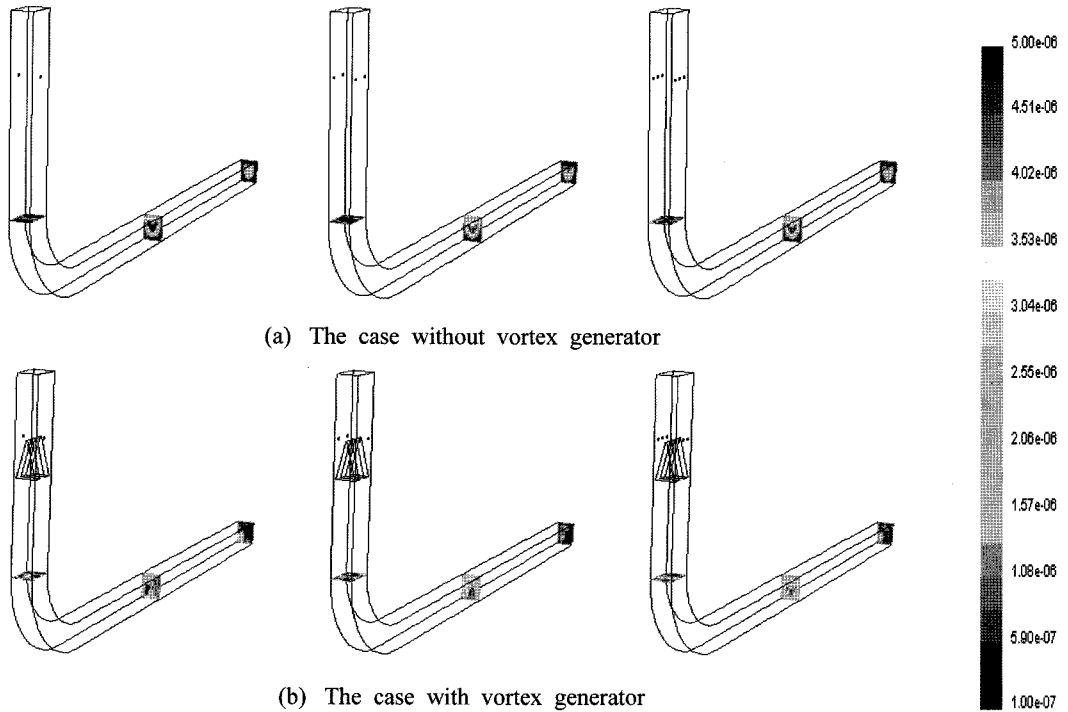


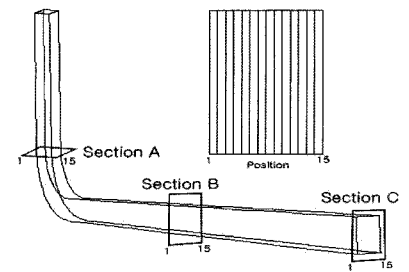
Fig. 4. Comparison with dispersion trend of sorbent

Table 1. Sorbent distribution of section C

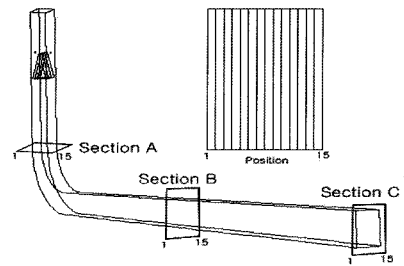
The case without vortex generator		
2 Holes	4 Holes	6 Holes
The case with vortex generator		
2 Holes	4 Holes	6 Holes

석회화 분사되는 분사구의 위치와 분사 후 이동거리에 따른 분산성향을 나타낸 것이다. 이때의 SR비는 3으로 고정하였고 결과표시지점은 Fig. 1에서 표시된 것과 같은 section A, B, C 세 단면이다. Table 1은 각 경우의 Section C에서의 흡착제 분산성향을 더욱 자세히 나타낸 것이다.

그 결과 vortex generator가 설치되지 않은 경우 분사된 소석회화 초기에 별다른 분산 없이 덕트 벽면에 편



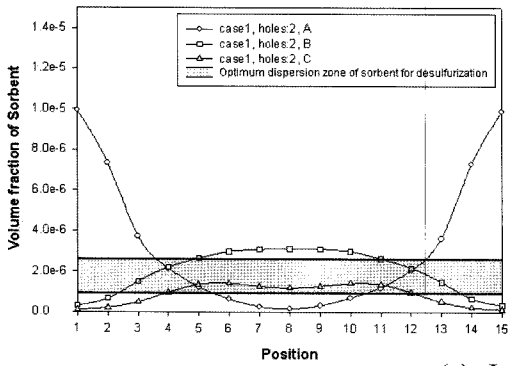
(a) The case without vortex generator



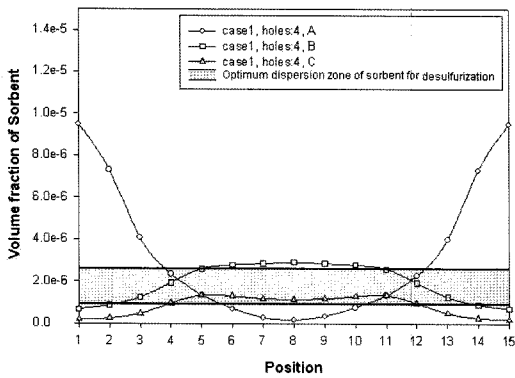
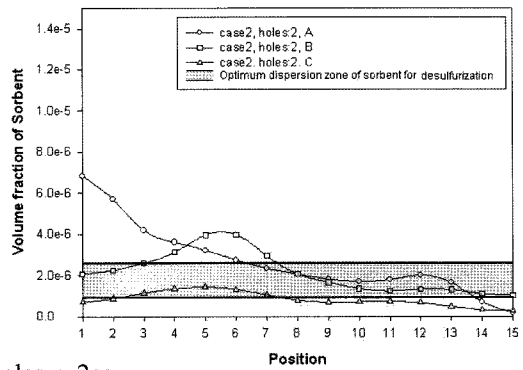
(b) The case with vortex generator

Fig. 5. Configuration of position

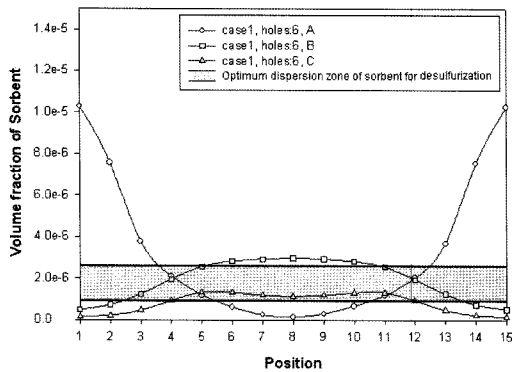
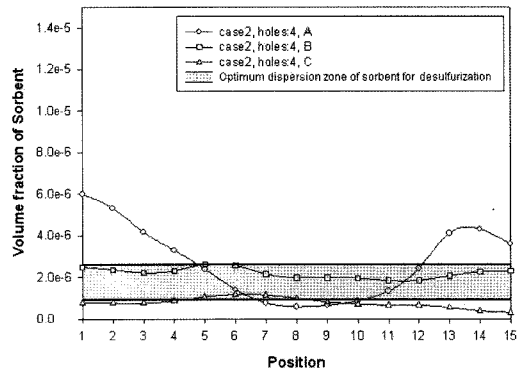
중되어 이동하다가 곡관을 지난 후 부터 고른 분산을 보였으며 분사초기에는 소석회화 분사되는 분사구의 수



(a) Injection holes : 2ea



(b) Injection holes : 4ea



(c) Injection holes : 6ea

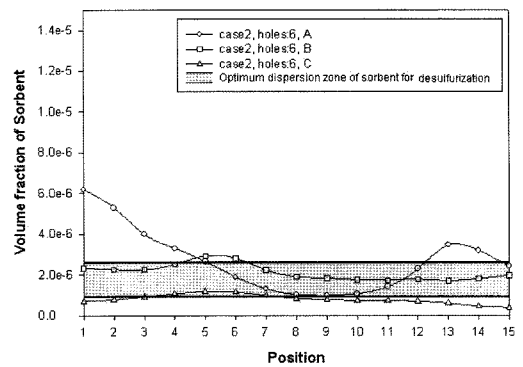


Fig. 6 Graph on volume fraction of sorbent

가 증가 할수록 고른 분산을 보였다. 반면 vortex generator가 설치 된 경우에는 분사된 소석회와 기류가 vortex generator를 지나면서 유동장의 급격한 변화와 함께 분산을 이루었고 곡관을 지난 후에는 단면 전 지역에 걸쳐 고른 분산을 보이는 것을 확인 하였다. 덕트에 직접 소석회를 분사하여 황산화물을 제거하는 DSI공법의 경

우 덕트 길이의 제한으로 소석회와 황산화물의 접촉율과 반응시간 확보가 탈황효율에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 분사된 소석회와 황산화물의 초기 반응을 향상 방안으로 vortex generator 설치가 유용함을 확인할 수 있었다.

Figure 6에서는 Fig. 4의 분산 성향에 대한 보다 정확

한 분석을 위하여 section A, B, C 각 단면적에 존재하는 소석회의 부피비를 덕트의 폭 방향으로 Fig. 5와 같이 15등분 한 후 평균화하여 이 값들을 황산화물과 소석회가 1:1반응을 할 수 있는 SR 1이상(부피분율= 8.86×10^{-7})의 부피비를 나타낸 기준선(최소분산 기준선)과 SR 3(부피분율= 2.56×10^{-6})이상의 부피비를 나타낸 기준선(완전분산 기준선)의 영역과 함께 표시하여 덕트 내 분산특성을 보다 정확히 비교 할 수 있도록 vortex generator가 설치되지 않은 경우를 case 1로, vortex generator가 설치 된 경우를 case 2로 하여 표현하였다.

Figure 6(a)에서 vortex generator가 설치되지 않은 경우(case 1) 소석회가 분사되는 분사구의 개수와 상관없이 단면 A에서는 덕트 벽면에 소석회가 편중되어 존재하였고 덕트 중심부까지의 소석회 분산은 보이지 않았다. 그리고 벽면을 제외한 대부분의 경우에서 최적 분산 영역에서 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 덕트 내를 이동한 소석회는 덕트의 곡관 부위를 지난 후인 단면 B에서 확인할 수 있듯이 벽면을 중심으로 편중 분산되었던 소석회가 덕트 중심부의 이동을 보였다. 이 단면에서는 포지션 2부터 14까지 최적 분산 영역에 포함되는 부피비로 존재하였기 때문에 단면 B의 하류영역에서는 대부분의 영역에서 탈황반응이 일어날 것이라고 판단된다. 반면 vortex generator가 설치 된 경우(case 2), 분사된 소석회는 단면 A의 포지션 1부터 6까지 편중 분산된 성향을 보이지만 거의 전 면에서 최적 분산 영역에 소석회가 존재하므로 소석회 분사 초기부터 탈황 반응이 진행 될 것으로 보인다. 벽면에서 편중 분산 성향을 보였던 소석회는 곡관을 지나면서 최적 분산 영역에 포함되며 비교적 고른 분산 성향을 보였다. 단면 C에서도 역시 대부분의 소석회 분산은 최적 분산 영역 내에 포함되었다.

Figure 6(b)에서 vortex generator가 설치 된 경우(case 2) 소석회 분사구는 4개로 분석을 위한 A, B, C 모든 단면에서 최적 분산 연역에 존재 하였고 단면 B의 경우 최적 분산 영역 내에서도 가장 고른 분산이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6(c)에서 vortex generator가 설치 된 경우(case 2)도 분석된 모든 단면에서 소석회의 분산 경향은 최적 분산 영역에 포함되는 것을 확인할 수 있었다. 대체적으로 vortex generator를 설치한 경우(case 2)가 설치하지 않은 경우(case 1)보다 고른 소석회의 분산 경향을 보였는데, 이는 덕트 내로 유입된 공기와 소석회가 vortex generator 지나면서부터 활발한 유동장의 변화와 난류의 영향으로 소석회와 기류의 혼합이 이루어졌을 것으로

판단된다. 그리고 혼합촉진 장치를 설치할 경우에 본 연구대상 모델에서는 4개의 분사구를 설치하였을 때 최대 탈황 효율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 건식탈황공정 중 DSI공법의 탈황효율 향상에 관한 연구로서 수치해석적 방법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. vortex generator가 없는 경우 덕트 내로 분사된 소석회는 곡관을 지나기 전까지 별다른 유동장의 변화 없이 덕트 내를 이동하였고 이후 곡관을 지난 후부터 유동장의 변화를 보였다.
2. 분사구의 수가 증가할수록 소석회의 분산비율도 커졌는데, 이는 덕트의 상류부분 유동장의 변화가 미약하므로 단지 분사되는 지점의 증가로 나타난 결과이다.
3. 반면, vortex generator가 있는 경우에는 vortex generator를 기류와 소석회가 지나면서 현격한 유동장의 변화를 보였고 그 결과로서 소석회의 고른 분산이 덕트의 상류부분에서 이루어짐을 확인하였다.
4. 또한, 본 연구의 해석대상모델의 경우에서는 4개 이상의 분사구에서 소석회를 분사했을 때 소석회의 고른 분산을 확인할 수 있었다.

일반적으로 탈황효율의 향상과 소석회와 황산화물의 접촉율은 비례하므로 접촉율의 향상을 위하여 vortex generator를 설치하는 것이 효과적임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2007년도 산업자원부 전력산업 연구개발 사업의 일원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Paul S. Nolan, 2000, "Flue gas desulfurization technologies for coal-fired power plants", Coal-tech 2000 international conference.
- (2) R. M. Rice and G. A. Bond, "Flue gas desulfurization by in-duct dry scrubbing using calcium hydroxide", AIChE J, Vol. 36, No. 3, 1990, pp. 473~477.

- (3) J.-D. Chung, J.-W. Kim, B.-H. Kim and Y.-M. Park, "Numerical analysis for improving of SO_x removal efficiency in the DSI(Dry sorbent injection technology) of FGD system(1)", Korea society of environmental engineers, Vol. 29, No. 1, 2007, pp. 47~53.
- (4) S. V. Patanker, "Numerical heat transfer and fluid flow", McGraw-hill, 1980.
- (5) G. Aurora, A. M. Jose and I. Angel, "Mechanistic and non-linear modeling approaches to in duct desulfurization", Chemical engineering and processing, 2005, pp. 709~715.
- (6) C. Crowe, M. Sommerfield, and Yutaka Tsuji. "Multiphase flows with droplets and particles", CRC Press, 1998.
- (7) J. O. Hinze, "Turbulence" McGraw-hill, 1965.
- (8) FLUENT user's guide, 2005.