

충진층식 스크리버의 스프레이 시스템 최적 설계에 대한 수치해석적 연구

고 승 우,¹ 노 경 철,² 유 흥 선^{*3}

NUMERICAL STUDY ON THE OPTIMAL DESIGN OF SPRAY SYSTEM IN PACKED BED SCRUBBER

S.W. Ko,¹ K.C. Ro² and H.S. Ryou^{*3}

This study evaluates the performance of the packed bed scrubber and proposes the optimization of spray system for improvements of collection efficiency. The packed bed scrubber is used primarily in the semiconductor manufacturing process. The mean diameter of entering solid particles in scrubber is the submicron. The impaction between water droplets and solid particles is an important factor in removing the solid particles. Thus, the coverage area of spray system influences on the collection efficiency. The collection efficiency of a single droplet is calculated through the mathematical model and numerical calculations are performed for coverage area for each nozzle type (Droplet diameters: 500, 319.5, 289.5 μm) and injected directions (0, 15, 30°). In case of nozzle type 3, the collection efficiency of a single droplet is highest but the collection efficiency of spray system has lowest value because the ratio of flow rate between the gas and water is below 0.1. The results show the coverage area ratio is about 85% in the case of nozzle type 3 and downward direction 15°. It was shown that a coverage area increase by two times than an existing spray system. In simulation of demister, collection efficiency by demister is predicted about 80% and the pressure drop in demister is below 3.5 Pa.

Key Words : 집진효율(Collection Efficiency), 스프레이 시스템(Spray System), 액적 분무 반경(Coverage Area)

1. 서 론

유해가스 및 미세 입자에 의한 환경 오염 및 질병 유발에 대한 관심이 증대되고 있으며, 이러한 입자상 물질 제거를 위한 다양한 장비 및 기술들이 산업현장에 적용되어지고 있다. 이러한 입자상 물질 제거에 사용되는 스크리버에는 Wet Scrubber, Electrostatic precipitator, Cyclone과 같은 다양한 형태가 있다. 본 논문에서 해석되어진 충진층식 스크리버는 철망 구조의 데미스터와 스프레이 시스템으로 구성되어져 있으며, 스프레이 시스템은 데미스터를 통과하는 입자상 물질의 제거 및 데미스터의 세척시스템의 역할을 한다. 가스내의 입자상 물질은 데미스터에서의 점착과 분무 액적과의 충돌(impaction) 현상에 의하여 집진이 이루어진다. 스프레이 시스템의 경우,

크기가 1 μm 이하의 경우, 집진효율이 급격히 감소하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 분무 액적의 분포 면적 및 액적과 입자상 물질의 충돌 확률 향상을 위한 개선방안이 요구되어진다. 스프레이 시스템을 이용한 스크리버의 집진효율 향상을 위한 다양한 실험적, 수치해석적 연구들이 수행되어지고 있다. A. Jaworek[1] 등은 Electro 스프레이 시스템을 이용하여 분무 액적에 의한 집진 효율 개선안을 제시하였다. Y. Bozorgi[2] 등은 스프레이 타워 형태의 스크리버에서의 집진 효율 평가를 위해 노즐의 분무 유량 및 스프레이 콘(cone)의 투영면적을 고려한 수학적 모델을 제시하였다. 그러나 스프레이에서 발생되어지는 단일 액적의 분열 및 액적간의 충돌 현상 등에 대하여 고려하지 않았다. Yoo[3] 등은 스프레이 시스템의 분무 유량 및 유해 가스의 유입속도에 따른 집진 효율에 대하여 실험적으로 연구하였다.

본 연구에서는 스프레이 시스템에서 분무되어지는 액적의 분포 면적을 개선하기 위한 스프레이 시스템 개선안을 제시하고, 충진층식 스크리버의 집진 성능 평가를 위한 수치해석적 연구를 수행하였다.

접수일: 2006년 12월 28일, 심사완료일: 2007년 3월 14일.

1 학생회원, 중앙대학교 대학원 기계공학과

2 비회원, 중앙대학교 기계공학부

3 정회원, 중앙대학교 기계공학부

* Corresponding author, E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

2. 수치해석

2.1 지배방정식

스크러버에서의 가스 유동 해석을 위하여 대표적인 난류모델인 κ - ϵ 모델[5]을 사용하였고, 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\gamma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

여기서, κ 는 난류에너지, ϵ 은 난류에너지의 소산율을 나타낸다. 입자상 물질과 액적의 거동 해석은 Lagrangian method를 이용하여 모사하였다. 시간에 따른 단일 액적의 속도 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\frac{du_d}{dt} = F_d(u_g - u_d) + \frac{g_x(\rho_d - \rho_g)}{\rho_d} \quad (3)$$

$F_d(u_g - u_d)$ 는 액적에 작용하는 항력을 의미하며, u_g 와 u_d 는 기상과 액적의 속도, ρ_g 와 ρ_d 는 기상과 액적의 밀도를 나타낸다.

2.2 스프레이 모델

노즐에서 분무되어지는 액적은 공기역학적 힘에 의하여 분열되어지며, R&D[10] 모델, Wave[11] 모델, Tab[6] 모델이 대표적인 액적 분열 모델이다. 본 연구에서는 Tab 모델을 사용하여 액적 분열을 모사하였다. TAB 모델은 액적의 distortion과 spring-mass 시스템간의 Taylor's analogy 관계를 기반으로 한 액적의 분열 모델이다. 액적에 작용하는 공기역학적 힘에 의한 액적의 진동을 강제 조화 운동 및 점성 감쇠 운동 방정식으로 다음과 같이 나타내었다[1].

$$m\ddot{x} = F - kx - \dot{d}\dot{x} \quad (4)$$

위의 방정식의 계수를 Taylor's analogy[6] 관계를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{F}{m} = C_F \frac{\rho_g (u_g - u_d)^2}{\rho_d r} \quad (5)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_d r^3} \quad (6)$$

$$\frac{d}{m} = C_b \frac{\mu_d}{\rho_d r^2} \quad (7)$$

x 는 액적의 중심으로부터 떨어진 거리를 나타내며, 식 (4)을 통하여 액적의 distortion을 구하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{C_F}{C_k C_b} We + e^{-t/t_d} \left(y_0 - \frac{C_F}{C_k C_b} We \right) \cos \omega t + e^{-t/t_d} \frac{1}{\omega} \left(\dot{y}_0 + \frac{C_F}{C_k C_b} \frac{We}{t_d} \right) \sin \omega t \quad (8)$$

여기서 We 는 웨버수를 나타내며, C_F , C_k , C_b 는 상수이며, $y > 1$ 인 경우 액적의 분열이 발생하게 된다.

액적의 충돌 모델은 O'Rourke[7] 모델을 사용하였다. O'Rourke 모델의 경우 두 개의 액적이 동일한 cell내에 존재하였을 때 충돌이 발생한다. cell내에서 평균 충돌 회수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{n} = \frac{n\pi(r_1 + r_2)^2 v_{rel} \Delta t}{vol} \quad (9)$$

O'Rourke 모델의 경우, 액적간 충돌 후의 결과를 b_{crit} (impaction parameter)에 의하여 coalescence와 separation의 두 가지 형태로 구별한다[8].

$$b = (r_1 + r_2) \sqrt{\bar{Y}} \quad (10)$$

$$b_{crit} = (r_1 + r_2)^2 Mn \left(1.0, 2.4 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^3 - 2.4 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 + 2.7 \right) / We \quad (11)$$

식 (10)의 b 는 실제 충돌 변수이며, 이는 두 액적의 크기 및 랜덤 넘버 $Y(0-1)$ 에 의해 결정된다.

b 가 b_{crit} 보다 작은 경우 coalescence가 발생하며, b_{crit} 보다 큰 경우는 separation이 발생한다.

2.3 집진효율

액적과 입자상 물질의 충돌에 의한 집진효율을 평가하기 위해 단일 액적의 집진효율을 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다[7].

$$\eta_d = \left(\frac{K_p}{K_p + 0.7} \right)^2 \quad (12)$$

여기서 K_p 는 액적의 impaction parameter를 나타내며, 가스의 유동방향과 스프레이의 분사방향에 따라 vertical counter-flow, cross flow, 그리고 cocurrent flow로 분류되어진다. 이러한 3가지 타입을 Fig. 1에 나타내었다.

스프레이 시스템에 의한 집진효율은 다음과 같은 식에 의하여 집진 효율을 계산할 수 있다.

$$\eta = 1 - Pt_d \quad (13)$$

여기서 Pt_d 는 관성충돌에 의한 particle penetration을 나타내며, Vertical counter flow(spray down, gas up)의 경우 penetration은 아래와 같은 식에 의하여 계산되어진다.

$$Pt_d = \exp \left[- \frac{3Q_d u_d Z n_d}{4Q_g r_d (u_d - u_p)} \right] \quad (14)$$

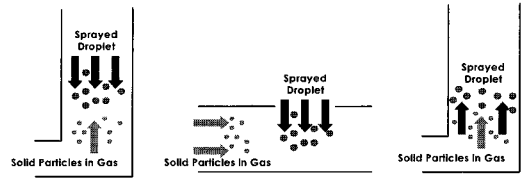
여기서 Q_d 은 스프레이 시스템에서 분사되는 물의 분무 유량, Q_g 은 스크러버로 유입되어지는 가스의 유량을 나타낸다. Z 는 스프레이 시스템 부분의 길이를 나타내며, u_d 와 u_p 는 각각 액적과 입자상 물질의 속도를 나타낸다. r_d 는 분무 액적의 직경을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석 조건

본 연구에서 해석되어진 스크러버는 Fig. 2에 보는 바와 같이 반경 0.145m, 높이가 1.56m이며, 데미스터와 스프레이 시스템의 3단 복합구조로 이루어져 있다. 스크러버의 전체 집진 효율을 평가하기 위해 데미스터 부분과 스프레이 시스템 부분을 분리하여 해석하였다. 데미스터에서의 집진 성능을 평가하기 위하여 데미스터의 기공률(98.2%)을 고려하여 형상을 모델링 하였고, 데미스터 철망 표면에 입자상 물질의 집착되어지는 현상을 모사하기 위해 철망의 표면에 "Trap" 경계조건을 적용하였다. 격자개수는 570,000개이며, ICEM-CFD를 이용하여 격자를 생성하였다.

데미스터를 통과한 입자상 물질은 스프레이 시스템에 의해 다시 집진이 이루어진다. 기존의 스크러버의 경우 분무 방향이 Vertical counter flow 형태로만 구성되어있으며, 이와 같은 경우에는 액적의 분포 면적이 상대적으로 작다. 그러므로 액적과 입자상 물질의 충돌 확률이 적으며, 집진 효율 또한 급



(a) vertical counter-flow (b) cross-flow (c) cocurrent flow

Fig. 1 The representative type of spray and gas flow directions

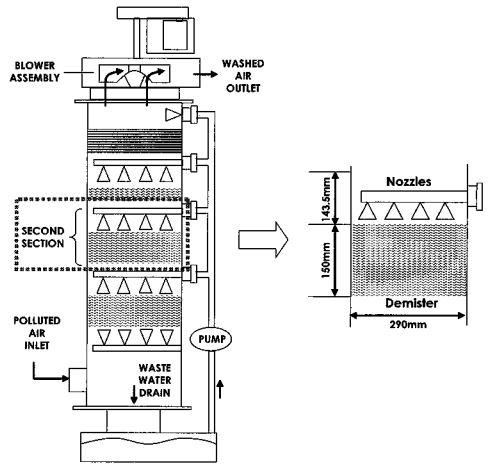


Fig. 2 The schematic of packed bed scrubber system and the dimensions of second section

격히 감소할 것으로 사료된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 노즐의 분사방향을 반경방향(0°, 15°, 30°) 및 하부방향(0°, 15°, 30°)으로 변경하여 액적 분포 면적을 예측하였다. 스프레이 시스템의 분사 방향에 따른 시스템 설계안을 Table 1에 나타내었다. 또한, 분무 액적의 크기 및 유량에 따른 액적 분포 면적을 예측하기 위하여 3가지 타입의 노즐을 사용하였다. 노즐 타입에 따른 특성을 Table 2에 나타내었다. 데미스터를 통과한 후의 가스의 속도는 약 0.135 m/s이며, 스프레이 시스템 해석을 위한 계산영역의 격자개수는 118,000개로 ICEM-CFD를 이용하여 생성하였다. Fig. 3은 데미스터의 형상 구조 및

Table 1 The injected direction of spray system for each case

| | Previous | case1 | case2 | case3 | case4 | case5 |
|----------------------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Down Direction Angle | 90° | 0° | 15° | 30° | 15° | 15° |
| Side Direction Angle | 0° | 0° | 0° | 0° | 15° | 30° |
| Quantity of Nozzle | 5 | 4 (center nozzle removed) | | | | |

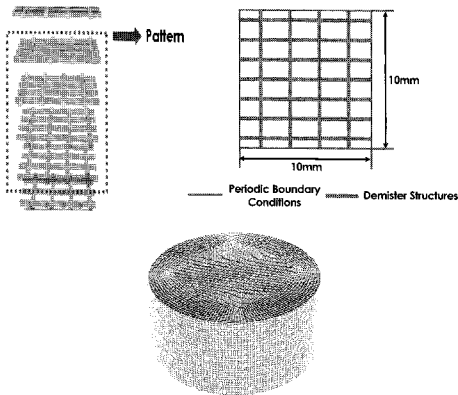


Fig. 3 The structure of demeter and the grid system for spray system

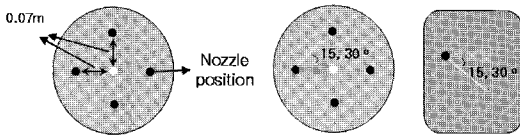


Fig. 4 The schematic diagrams of nozzle position and injected directions

스프레이 시스템 시뮬레이션에 사용된 격자 구조를 나타내고 있다. 노즐의 위치 및 분사방향에 대한 개념도를 Fig. 4에 나타내었다. 데미스터 및 스프레이 시뮬레이션은 상용코드인 Fluent ver 6.2를 이용하여 수치해석 하였다.

3.2 수치해석 결과

3.2.1 데미스터의 집진효율

데미스터에서의 압력강하는 약 3.5 Pa로 예측되었으며, 데미스터를 통과함에 따른 압력 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 데미스터를 통과하는 입자상 물질의 개수를 예측하여, 데미스터의 집진 성능을 평가하였다. Fig. 6는 데미스터의 위치에 따른 입자상 물질의 개수를 나타내고 있다. 데미스터에 의한 집진 효율은 다음과 같은 식을 통하여 계산하였다.

$$\eta_{dem} = \frac{N_{out}}{N_{ent}} \times 100 \tag{15}$$

식 (15)를 이용하여 데미스터의 집진 효율을 계산한 결과 약 80%의 집진 효율을 나타내었다.

3.2.2 스프레이 시스템의 액적 분포 면적

Fig. 7은 액적의 분포를 데미스터 상부에서 나타낸 그림이며, 각 단면의 전체 면적 중 액적의 분포 면적을 비율로 나타

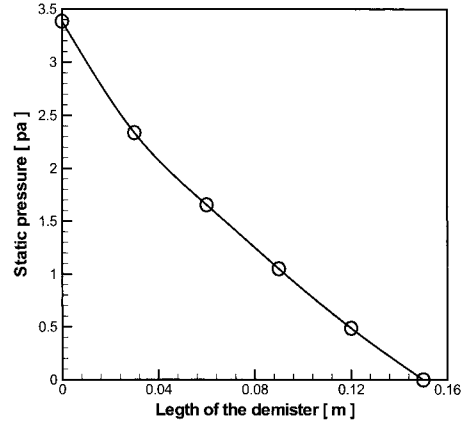


Fig. 5 The static pressure as length of the demister

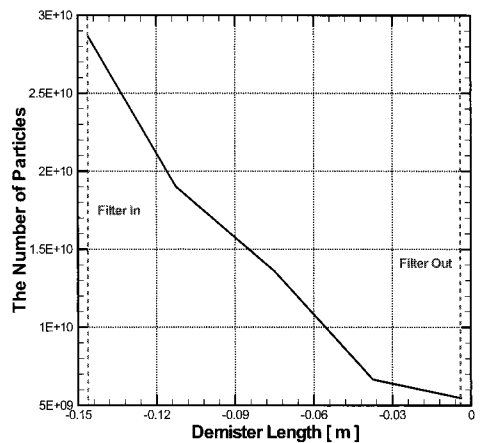


Fig. 6 The number of particle matters depending on the demister length

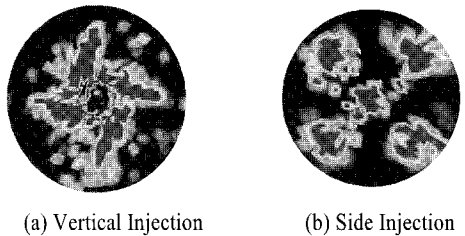
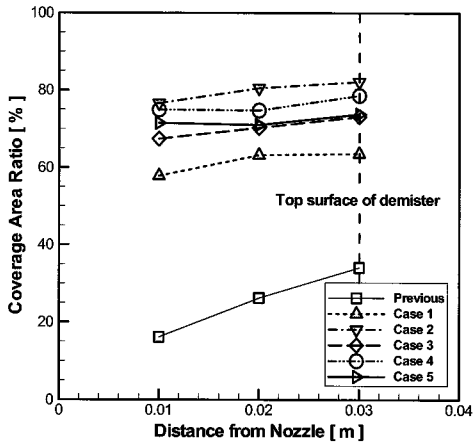


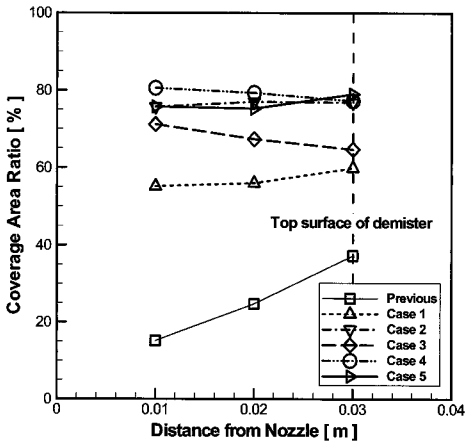
Fig. 7 The Spray droplet concentration

Table 2 The characteristics of each nozzle type

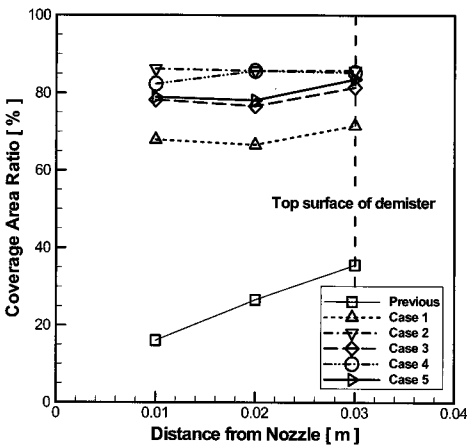
| Nozzle Type | Flow rate | Cone angle | SMD | Operating Pressure |
|-------------|--------------|------------|----------|----------------------|
| Nozzle 1 | 0.152 kg/s | 120° | 500 μm | 1 kg/cm ² |
| Nozzle 2 | 0.1497 kg/s | 120° | 319.5 μm | 5 kg/cm ² |
| Nozzle 3 | 0.04491 kg/s | 120° | 289.5 μm | 6 kg/cm ² |



(a) nozzle type 1

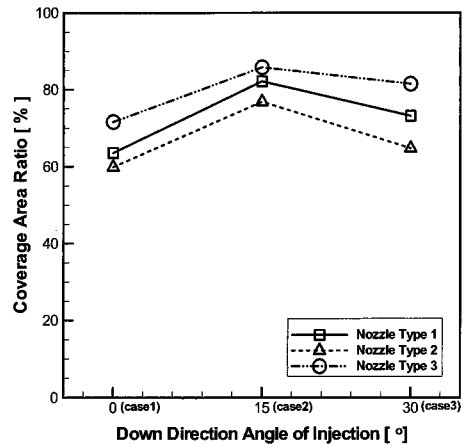


(b) nozzle type 2

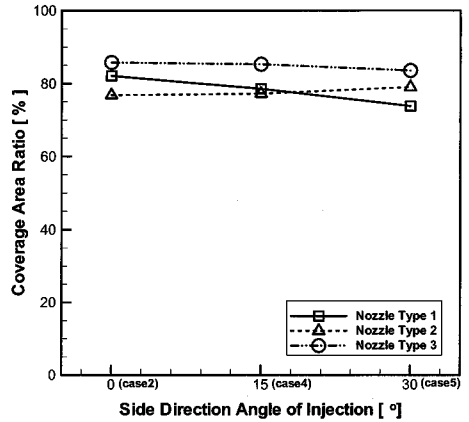


(c) nozzle type 3

Fig. 8 The coverage area ratio of new spray system with nozzle type



(a) down direction



(b) residual direction

Fig. 9 The coverage area ratio with injected direction angles

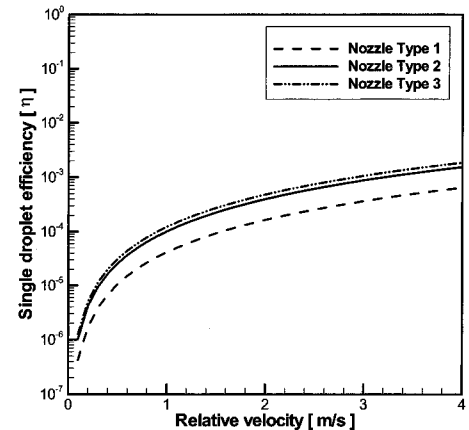


Fig. 10 The collection efficiency of a single droplet as relative velocity for each nozzle type

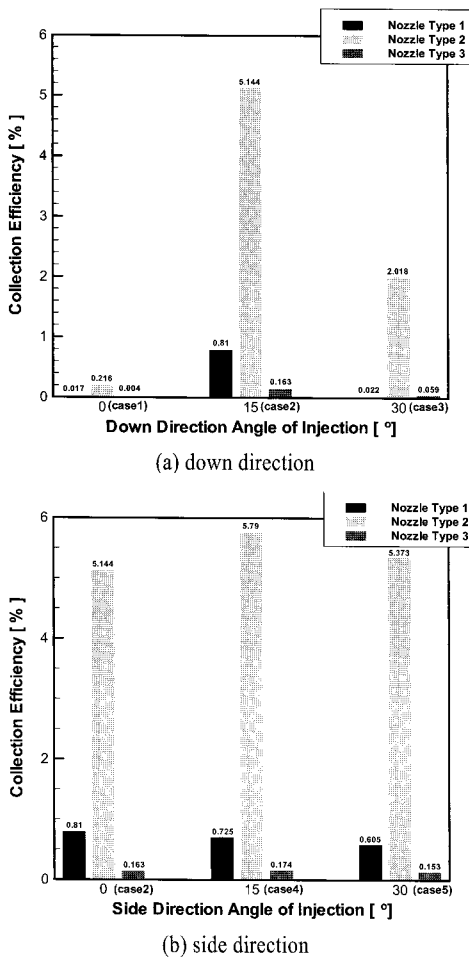


Fig. 11 The collection efficiency of spray system with injected direction

내어 스프레이 시스템간 액적의 분포 및 집진 성능을 간접적으로 예측하는데 사용하였다.

노즐 타입 및 스프레이 시스템의 분사방향에 따른 액적 분포 면적 비율을 예측한 결과를 살펴보면, 기존 시스템의 경우 Fig. 8의 기존의 수직 분사형 노즐시스템에서는 노즐 타입 3 가지 모두 액적의 분포면적 비율이 40% 미만으로 나타났다. 하부 방향으로만 분사되어지는 시스템은 액적의 체류시간이 적고 분무각에 의해서만 액적 분포 면적 비율이 정해지기 때문으로 사료된다. 노즐 타입 및 분무 방향에 따른 액적 분포 면적 비율을 살펴보면 노즐 타입 1,3의 경우 하부방향으로 15° 분사하는 시스템에서 분무 반경이 80% 이상으로 예측되었다. 노즐 타입 2의 경우는 하부방향으로 15°, 반경방향으로 15°의 스프레이 시스템에서 액적 분포 면적 비율이 최대로 예측되었다. 노즐 타입 및 스프레이 시스템에 따른 액적 분포

면적 비율을 Fig. 8에 나타내었다. 스프레이 시스템의 하부 및 반경 방향에 따른 액적 분포 면적 비율을 Fig. 9에 나타내었다. 하부 방향으로의 분사 방향에 따른 면적 비율을 살펴보면 하부 방향으로 15°인 경우, 모든 노즐 타입에서 면적 비율이 가장 높은 것으로 예측되었다. 반면 반경방향에 따른 면적 비율을 살펴보면 분사 방향은 면적비율에 영향을 미치지 않는 것으로 예측되었다.

3.2.3 스프레이 시스템 집진 성능

노즐 타입별로 단일 액적의 집진 효율을 식 (13)을 이용하여 계산한 결과 노즐 타입 3의 경우 단일 액적의 집진 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 액적의 크기가 작을수록, 액적과 입자상 물질의 상대속도가 클수록 단일 액적 집진 효율이 높기 때문이다. 그러나 액적의 크기에 비하여 입자상 물질의 직경이 0.3 μ m로 매우 작기 때문에 단일 액적 집진 효율은 매우 낮은 것으로 나타났다. 노즐 타입별 상대속도에 따른 단일 액적 집진 효율을 Fig. 10에 나타내었다. 단일 액적의 집진 효율을 이용하여 스프레이 시스템 및 Fig 11의 노즐 타입에 따른 스프레이의 집진 성능을 평가한 결과, 하부 방향 15°로 분사하는 스프레이 시스템이 집진 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그러나 액적의 분포 면적 비율이 가장 높게 나타났던 노즐 타입 3의 경우 분무 유량이 노즐타입 2에 비하여 약 1/3이기 때문에 스프레이에 의한 집진 성능은 낮은 것으로 나타났다. 결과적으로 스프레이 시스템의 집진 성능을 향상시키기 위해서는 집진하고자 하는 입자상 물질과 액적의 직경비가 1에 근접할수록, 상대속도는 클수록 집진 효율이 향상되어진다. 또한 노즐에서 분무 되어지는 유량과 유입 가스의 유량 비에 따라 집진 성능은 크게 달라진다.

4. 결 론

본 연구는 충진층식 스크리버의 스프레이 시스템의 성능을 수학적 모델을 통하여 평가하였다. 액적과 입자상 물질의 충돌현상에 의한 집진 성능 향상을 위해 스프레이 시스템의 최적 설계안에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 액적의 분포 면적 비율은 노즐 타입 3를 이용하여, 하부 방향으로 15° 분사하는 시스템에서 87%로 최대값을 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 하부방향으로만 분사하는 시스템에 비하여 약 2배 정도 향상되었다.
- (2) 단일 액적의 집진 효율은 액적과 입자상 물질의 크기비가 1에 가까워질수록 증가한다. 노즐 타입 3의 경우에서 단일 액적의 집진 효율이 높은 것으로 나타났다. 스프레이

시스템의 집진 성능은 노즐 타입 2를 이용하여 하부방향으로 15°, 반경방향으로 15° 분사하는 경우 집진효율이 5.79%로 나타났다.

- (3) 데미스터에서의 압력강하는 3.5Pa 미만으로 나타났으며, 데미스터에 의한 집진 효율은 80%로 예측되었다.

후 기

본 논문은 철도종합 안전기술 개발사업(T305C100005-05C0100-00512)의 지원으로 수행되었으며, 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A. Haider and O. Levenspiel, 1989, "Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles," *Powder Technology*, Vol.58, pp.63-70.
- [2] A. Jaworek, W. Balachandran, M. Lackowski, J. Kulon, A. Krupa, 2006, "Multi-nozzle electro spray system for gas cleaning processes," *Journal of ELECTROSTATICS*, Vol. 64, pp.194-202.
- [3] Y. Bozorgi, P. Keshavarz, M. Taheri, J. Fathikaljahi, 2006, "Simulation of a spray scrubber performance with Eulerian/Lagrangian approach in the aerosol removing process," *Journal of Hazardous Materials*, Vol.137, pp. 509-517.
- [4] Kyung-Hoon Yoo, Hee-Hwan Roh, Enu-Soo Choi, Jong-Kyoon Kim, 2003, "An Experimental on the Particle Collection characteristics in a Packed Wet Scrubber," *Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol.15, pp. 305-311.
- [5] B.E. Launder and D.B. Spalding, 1972, "Lectures in Mathematical Models of Turbulence," *Academic Press*, London, England.
- [6] G. I. Taylor, 1963, "The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream," Technical report, In the Scientific Papers of G. I. Taylor, ed., G. K. Batchelor.
- [7] Peter J. O'Rourke and Anthony A. Amsden, 1987, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Dropelt Breakup," *Society of Automotive Engineers*, SAE872089.
- [8] Peter J. O'Rourke, 1981, "Collecive Drop Effects on Vaporizing Liqid Sprays," *Ph.D. Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering, Priston University, USA*.
- [9] Seymour Calvert, Harold M. Englund, 1984, "HANDBOOK OF AIR POLLUTION TECHNOLOGY," *A Wiley-Interscience Publication*.
- [10] Reitz, R.D., and Diwakar, R. 1986. "Effect of drop breakup on fuel sprays," *SAE Technical Paper Series 860469*.
- [11] R. D. Reitz. 1987, "Mechanisms of Atomization Processes in High-Pressure Vaporizing Sprays", *Atomization and Spray Technology*, Vol.3, pp.309-337.