

2단식 전기집진기의 집진판 블록간격 및 입자크기가 입자의 부착효율에 미치는 영향

Effects of the Block Distance of Collecting Plate and Particle Size on the Particle Deposition Efficiency in the Two-Stage Electrostatic Precipitator

박 성 호 · 박 청 연¹⁾

경일대학교 공과대학 기계공학부, ¹⁾경일대학교 환경열공학연구소
(1999년 10월 4일 접수, 2000년 3월 20일)

Sung-Ho Park and Chung-Yeun Park¹⁾

Department of Mechanical Engineering, Kyungil University

¹⁾Thermal and Environmental Engineering Laboratory, Kyungil University

(Received 4 October 1999; accepted 20 March 2000)

Abstract

In this study, the effects of block distance have been investigated on the particle deposition efficiency in the collecting cell of two-stage electrostatic precipitator by numerical analysis. Particle trajectories have been changed by the electrostatic and inertial force of particle with the inlet velocity, electrostatic number, and particle diameter. The total deposition efficiency has a minimum value by the interaction between the effect of particle inertial force and electrostatic force in the collecting cell.

The increase of block distance makes the total deposition efficiency decrease under the range of the particle size which has the minimum deposition efficiency. However, beyond the range of particle size which has minimum deposition efficiency, total deposition efficiency has no trend with the variation of block distance.

Key words : collecting cell, block distance, electrostatic number, minimum efficiency particle diameter

1. 서 론

과학기술의 발전은 인간의 생활을 보다 편리하고 윤택하게 하는 데 중요한 역할을 담당한 반면, 환경오염의 주요한 원인이 되었다. 특히 대기오염은 인간의 직접적인 건강과 보전에 영향을 줄 뿐만 아니라 자연파괴의 주범이기도 하다. 따라서 최근에는

유해입자 배출저감을 위한 대기오염 제어기술에 대한 관심이 고조되어 있는데, 그 대표적인 장치가 전기집진기(electrostatic precipitator)이다. 전기집진기는 설치비가 많이 들고 비저항(resistivity)이 큰 입자는 제거하기 힘들다는 단점이 있는 반면, 저동력으로 많은 유량을 처리할 수 있고 광범위한 온도 범위에서 설제가 가능한 장점이 있으며, 작은 입자에 대한 상대적 집진효율이 높기 때문에 산업 및

공기 정화용 집진 장치로 널리 이용되고 있다. 전기 집진기는 입자의 하전 과정과 집진 과정이 동일한 곳에서 이루어지는 1단식(one-stage)과 독립적으로 이루어지는 2단식(two-stage)으로 분류된다. 1단식은 쓰레기 소각장, 용광로, 발전소 등에서 발생하는 배기가스를 정화하는데 사용되며, 용접 작업장이나 가공 공장에서의 용접 흠(fume), 오일 미스트(oil mist) 등의 처리와 일반 공조용에는 2단식 전기집진기가 적합하다. 현재까지 보고된 연구자료를 보면 전기집진기는 크게 코로나 방전에 의한 EHD(ElectroHydroDynamic)유동(Jeong and Kim, 1998; Yamamoto and Velkoff, 1981), 역 코로나(back corona) 현상(Chang and Bai, 1999; McLean, 1988), 집진판의 형상에 따른 실험적, 수치적 연구가 주를 이루고 있다.

복잡한 형상 내에서의 관성을 가진 입자들이 전기력과 상호작용하는 원리에 관하여, Dalmon과 Lowe(1961)는 장애물(obstruction)이 설치된 경우 와동(eddy)을 집진판 부근에 발생시키게 되고 난류강도를 증가시키기 때문에 장애물이 없는 경우 만큼의 효율을 나타내지 못한다고 하였고, Leonard *et al.*(1982)은 유동장내의 장애물(baffle)의 설치가 전기집진기의 성능을 저하시킨다는 결과를 보고하였다. 또한 Suh와 Kim(1996)은 블록(block)을 설치한 2단식 전기집진기에 대한 입경등에 따른 집진효율에 대한 해석에서 장애물의 존재가 언제나 집진효율을 저하시키는 것이 아님을 수치해석적으로 분석하였으며, Park(1999)은 캐비티 벽(cavity wall)을 가지는 1단식 전기집진기 내에서의 유동현상에 대해, 다양한 무차원 변수들을 사용하여 이들의 변화가 집진효율에 미치는 영향을 수치적, 실험적으로 해석하였다.

기존의 연구에서는 집진판 블록의 높이 변화(Suh and Kim, 1996) 및 난류강도가 집진효율에 미치는 영향에 대하여 1단식 혹은 2단식 전기집진기에 연구한 바 있다. 그러나 2단식 전기집진기에서 집진판의 블록간격이 입자의 이동 및 집진효율에 미치는 영향에 대한 연구가 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 2단식 전기집진기의 집진부에서 블록의 배치, 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도, 정전수 및 입자크기의 변화가 집진효율에 미치는 영향을 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

2.1.1 하전기구(charging mechanism)

2단식 전기집진기의 하전부로 유입된 입자들은 전기장내에서 단극성 확산하전과 단극성 전기장하전에 의해 전하를 획득하게 된다(Yoo *et al.*, 1997). 확산하전은 입자의 크기가 0.1 μm 이하인 경우에 지배적이며, 전기장하전은 1 μm 이상인 경우에 지배적이다. 하전부에서의 전기장강도 E_{ch} 에 의해서 직경 d 의 입자표면이 가질 수 있는 최대 하전량을 포화하전량이라고 하며, 전기장하전과 포화하전량에 대한 식은 다음과 같다(Yoo *et al.*, 1997; Hinds, 1982).

$$q_{field} = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E_{ch} d^2}{4q_e} \right) \left(\frac{\pi q_e Z_i N_i t}{1 + \pi q_e Z_i N_i t} \right) \quad (1)$$

$$q_{sat} = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \pi \epsilon_0 d^2 E_{ch} \quad (2)$$

여기서, q_{field} 는 전기장하전에 의한 입자의 전하량(C), ϵ_p 는 입자의 유전상수, E_{ch} 는 하전부에서의 전기장강도(V/m), d_p 는 입자의 직경(m), q_e 는 전자전하(C), Z_i 는 이온의 전기 이동율($m^2/V-s$), N_i 는 하전부에서의 공기 이온농도(ions/ m^3), t 는 입자의 하전부에서의 하전시간(sec), q_{sat} 는 포화하전량(C), ϵ_0 는 자유공간 유전율(F/m)이다. 본 연구에서는 코로나 방전에 의해 입자가 미리 포화하전이 되었다고 가정하고 입자의 크기가 1 μm 이상이므로 브라운확산은 무시한다.

2.1.2 입자의 횡단속도(migration velocity)

횡단속도는 정전기적인 쿨롱력과 점성력에 의한 종단속도(terminal velocity)를 의미하며, 하전부에서 하전된 입자는 집진부에 형성된 전기장내에서 횡단속도로 집진판을 향해 이동한다. 입자의 횡단속도에 대한 식은 다음과 같다(Yoo *et al.*, 1997; Hinds, 1982; Crawford, 1976).

$$u_e = \frac{q_{sat} E_{coll} C_c}{3\pi \mu d_p} \quad (3)$$

여기서, u_c 는 입자의 횡단속도, E_{coll} 은 집진부에서 전기장강도 (V/m , $E_{coll} = V_0/d$), V_0 는 고전압판의 인가전압 (kV), d 는 덕트폭, μ 는 기체의 점성계수를 의미한다. C_c 는 Cunningham 보정계수로서 일반적으로 다음과 같이 사용된다 (Yoo *et al.*, 1997; Suh and Kim, 1996).

$$C_c = 1 + Kn \left[A + Q \exp\left(-\frac{b}{Kn}\right) \right] \quad (4)$$

여기서, Kn 은 Knudsen 수 ($Kn = 2\lambda/d_p$)로서 기체의 평균자유행로와 입자 직경과의 비를 나타낸다. Cunningham 보정계수의 계산에 필요한 Davis (1945)에 의한 상수값은 $A = 1.257$, $Q = 0.4$, $b = 1.1$ 이다 (Reist, 1992).

2. 2 지배 방정식

전류 발생의 원인이 되는 공간전하는 입자가 가지고 있는 전하와 공기중의 이온에 의해 형성된다. 단분산(monodisperse) 입자의 경우, 한 입자의 전하량과 수농도에 비례하며 이는 유동장과 전기장에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 집진부에 대하여 낮은 입자 수농도가 가정된다. 그 결과 일방연계(one-way coupling)가 적용되고, 전기장하에서 입자 전하의 영향은 무시한다 (Crowe, 1982). 또한 이온은 코로나 방전이 없는 경우에는 존재하지 않는다고 가정하므로써 공간전하밀도는 유동장과 전기장에 영향을 미치지 않으며, 따라서 입자체적은 기체 유동장과 전기장을 독립적으로 계산한 이후에 수치적 통합에 의해 계산될 수 있다.

2. 2. 1 전기장 (electric field)

공간전하밀도를 무시함으로써 전기장에 대하여 Laplace 방정식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i^2} = 0, \quad E_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (5)$$

여기서, E 는 전기장강도, V 는 정전위 (electrical potential)를 의미하고, 입구와 출구에서의 경계조건은 $\partial V/\partial x = 0$ 이 적용된다.

2. 2. 2 유동장 (flow field)

2차원 비압축성 정상유동인 경우, 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (7)$$

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$\mu_i = C_\mu \rho k^2/\varepsilon \quad (9)$$

여기서, u_i 는 기체평균속도, ρ 는 기체밀도, u_i' 는 변동속도, $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈응력, μ_i 는 와점성계수를 의미한다. 레이놀즈응력에 대한 계산을 위해 본 연구에서는 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 적용하였다. 표준 $k-\varepsilon$ 모델은 유선곡율이 심한 2차원, 3차원 유동의 해석에서는 유동특성을 정확히 예측하지 못한다고 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 유동형태가 비교적 단순한 2차원 유동이며 입자의 크기가 $5 \mu m$ 에서 $100 \mu m$ 까지의 비교적 큰 입자를 대상으로 하고 있다. 따라서 대부분의 입자들이 관성력이 커서 블록 뒤에서 발생하는 재순환영역으로의 입자유입이 어려우므로 본 연구에서는 유동해석의 수렴성이 우수한 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 적용 한다. 난류운동에너지와 난류소산율에 관한 식은 다음과 같다 (Lauder and Spalding, 1974).

$$\frac{\partial \rho u_i k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho u_i \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

$$G = -\overline{\rho u_i' u_j'} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (12)$$

여기서, G 는 난류운동에너지 생성율, μ_{eff} 는 $\mu_{eff} = \mu + \mu_i$ 로 표현되는 유효점성계수이며, 상수는 $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 이다. 입구에서의 난류운동에너지와 소산율에 관한 경계조건은 $k = 0.003u_0^2$, $\varepsilon = C_\mu k^3/0.03d$ 를 적용하였고 (Lauder and Spalding, 1974), 균일 유동의 입구조건과 출구에 대하여 Neumann조건이 지정된다. 또한 벽면에서는 비활조건 (no-slip condition), 벽면에 가장 가까운 격자에 대하여 벽함수 (wall function)를 적용한다.

2. 2. 3 입자궤적 (particle trajectory)

입자의 궤적을 계산하기 위하여 Lagrange 접근법을 사용하였으며, 4차 Runge-Kutta 적분법이 적용된다. 라그랑지 접근법은 입자에 대하여 다양한 힘이 작용하는 유동장에서 한 입자의 궤적을 예견하는데 유용하며, Newton의 운동법칙을 사용하여 구한 입자의 속도를 시간에 대해 적분함으로써 입자의 위치를 얻을 수 있다. 무차원화 한 입자의 운동방정식은 다음과 같다 (Reist, 1992; Hinds, 1982).

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{C_D Re_p}{24 Stk} (u_i - u_i^p) + \frac{Es}{Stk} qE_i \quad (13)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad Re_p < 1000 \quad (14)$$

$$Re_p = \frac{\rho |u_i^p - u_i| d_p}{\mu} \quad (15)$$

$$Stk = \frac{\rho_p C_c u_0 d_p^2}{18 \mu d} \quad (16)$$

$$Es = \frac{C_c q_{sar} E_{coll}}{3 \pi \mu u_0 d_p} = \frac{u_e}{u_0} \quad (17)$$

여기서, C_D 는 입자의 항력계수 (Reist, 1992; Crowe and Stock, 1976), Re_p 는 입자의 레이놀즈 수, u_i^p 는

입자의 속도, ρ_p 입자의 밀도, u_0 는 덕트입구에서의 기체의 평균 유입속도이며, 입자의 초기속도는 u_0 와 같다고 가정한다. 입자운동의 해석에서 중요한 변수인 Stokes수 (Stk)는 관성력과 점성력의 비를 의미하며 (Reist, 1992; Hinds, 1982), Es 는 정전수 (Electrostatic number)로서, 정전기력과 점성력의 비를 의미한다 (Suh and Kim, 1996). 따라서 정전수가 증가하면 정전기력에 대한 영향이 증가함을 의미하며, 본 연구에서 중요한 무차원 변수로써 사용되어진다.

2. 2. 4 계산 영역 (Computation domain)

그림 1은 본 연구에서 사용된 집진부의 형상이다. 여기서, L 은 덕트의 길이, d 는 덕트폭, h 는 블록의 높이, w 는 블록폭, HV 는 인가전압, bd 는 블록간 거

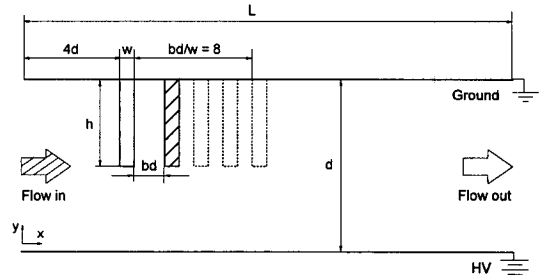


Fig. 1. Geometry of collecting cell.

Table 1. Physical properties for numerical calculation.

입자의 유전상수 (dielectric contant of particle, ϵ_p)	3.8
자유 공간 유전율 (permittivity of free path, ϵ_0)	8.854×10^{-12} (F/m)
이온의 전기 이동율 (electrical ion mobility, Z_i)	1.4311×10^{-4} ($m^2/V-s$)
기체의 평균자유행로 (mean free path, λ)	0.0651×10^{-6} (m)
기체의 점성계수 (viscosity of gas, μ)	0.185×10^{-4} ($kg/m-s$)
기체의 밀도 (density of gas, ρ)	1.18 (kg/m^3)
입자의 밀도 (density of particle, ρ_p)	2,350 (kg/m^3)
입자 수농도 (number concentration of particle)	10^7 (particles/ m^3)
고전압판의 인가전압 (applied voltage at the high voltage plate, V_0)	15 (kV)
덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도 (inlet mean gas velocity, u_0)	0.5, 1.0, 2.0 (m/s)
정전수 (electrostatic number, Es)	0.02, 0.04, 0.08
블록간격 (block distance, bd/w)	2, 4, 6, 8
입경 (particle diameter, d_p)	5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 (μm)
집진부 덕트의 길이 (duct length, L)	1.0 (m)
덕트 폭 (duct width, d)	0.05 (m)
블록의 높이 (block height, h)	0.025 (m)
블록의 폭 (block width, w)	0.03 (m)

리를 의미하며, 블록 높이는 문제의 단순화를 위하여 $d/2$ 로 일정하게 유지하였다.

본 연구에서는 직교좌표계에서, 유동장 해석을 위해 비균일 격자(nonuniform grid)를 이용하였고(127×52) 입자출발지는 입구에서 유동의 수직방향(y방향)으로 균일하게 1,000지점으로 하여 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도(u_0), 정전수(Es), 블록간격(bd/w) 및 단분산 입자(d_p)의 각각에 대한 유동현상과 집진효율의 관계를 알아보았다. 덕트 길이방향으로 부착되는 입자 개수의 누적합을 입구에서 유입되는 총입자 개수로 나눈 누적 부착효율(cumulative deposition efficiency)과 집진부 출구에서의 누적 부착효율을 총 부착효율(total deposition efficiency)로 정의하므로써 입자가 부착되는 양을 나타내었다. 또한 본 연구에서 사용된 SIMPLER 알고리즘에 의해 차분화된 방정식은, 질량 생성항의 오차에 대한 만족도가 10^{-6} 보다 작으면 수렴한 것으로 간주하였다(Patankar, 1980). 난류 유동장 해석용 프로그램을 검증하기 위하여 유동방향 평균속도 계산결과를 Crabb *et al.* (1977)의 실험결과와 비교한 바, 잘 일치함을 확인하였다. 각각의 변수에 대한 입력조건은 표 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 집진부 내부에 대한 유동의 속도벡터와 유선을 나타낸 것이다. 유동은 입구에서 균일하게 유입되어 블록을 향하여 이동한다. 블록 입구에 도달한 유동은 속도가 급격하게 증가하고 블록을 빠져나온 이후에도 그 영향이 어느정도 지속되고 있으며, 전체적으로는 집진판쪽으로 기울어져 블록 뒷부분에 재순환영역을 형성한다. 그러나 재순환 영역에서의 유동속도는 크기가 매우 작다. 이러한 현상은 두 번째 블록에서도 동일하게 나타난다.

그림 3은 정전수의 증가에 따른 입자궤적을 나타낸 것이다. 정전수가 높아짐에 따라 집진판 또는 블록쪽에서의 궤적의 기울기가 증가하고, 부착되는 양도 많아짐이 두 입경 모두에게 나타난다. 정전수가 0.02인 경우, $5 \mu\text{m}$ 입자는 부착되는 분포가 덕트 길이방향으로 다양하게 이루어지고 유선의 흐름과도 비슷하다. 이는 크기가 작기 때문에 관성의 영향이 작고 정지거리(stopping distance) 또한 짧아져서 쉽게 기류의 변화에 적응하기 때문이다. 그러나 $100 \mu\text{m}$ 입자는 관성력의 증가로 급격한 유선의 변화를

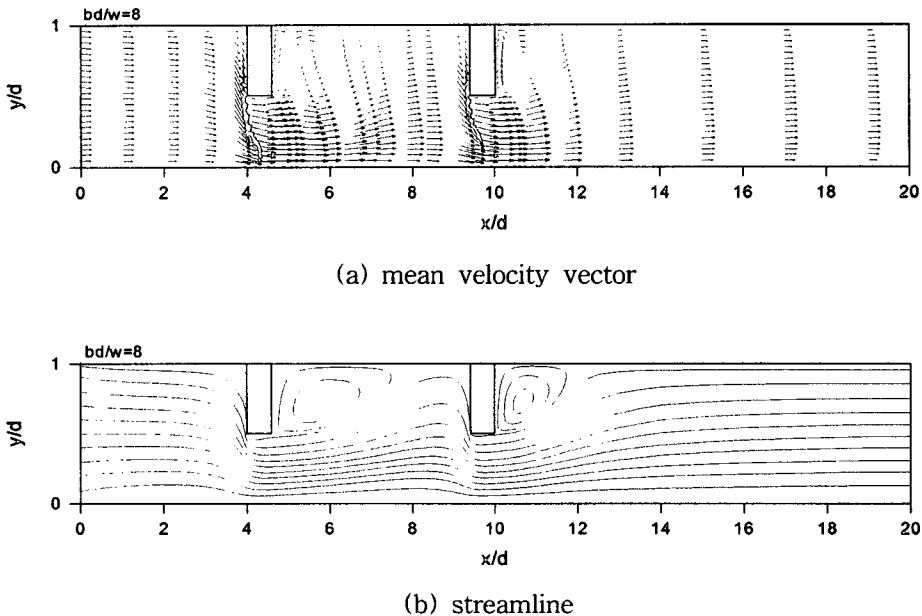
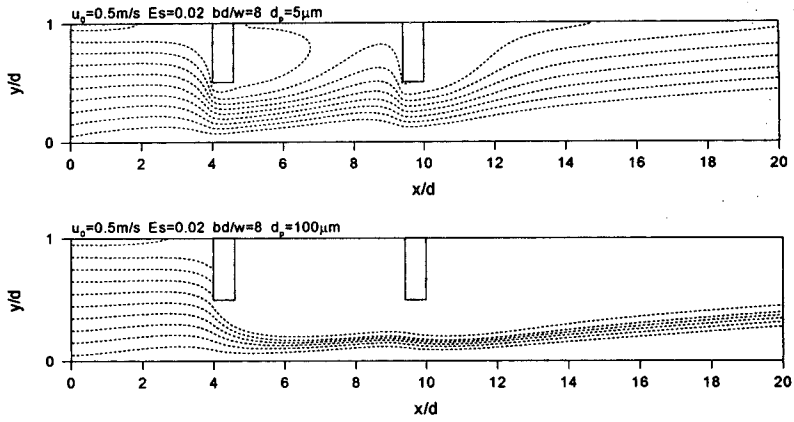
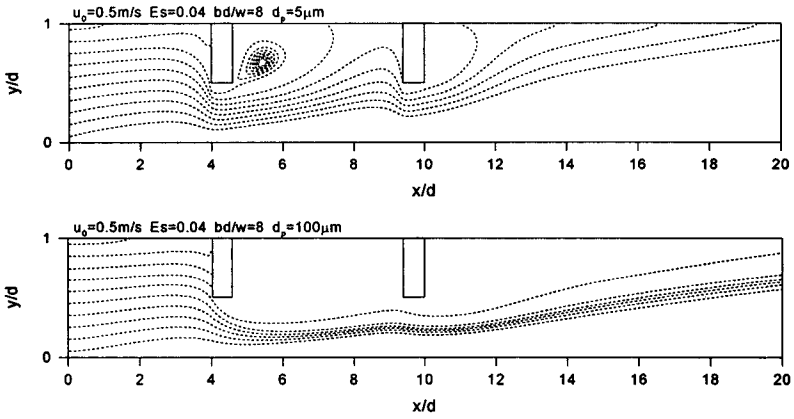


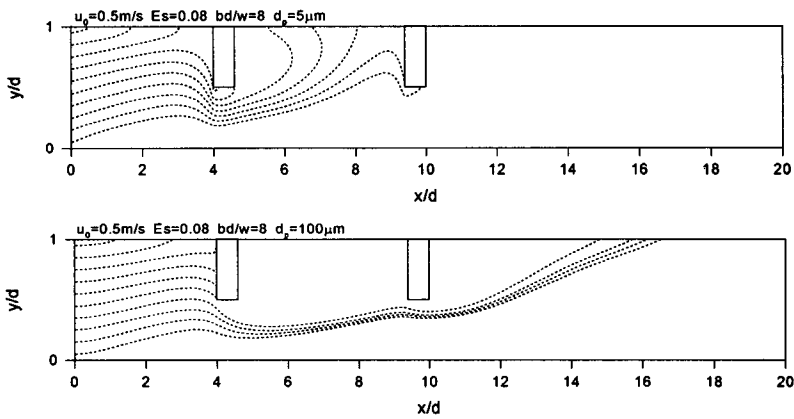
Fig. 2. Mean velocity vector (a), streamline (b) with $u_0 = 2.0 \text{ m/s}$, $bd/w = 8$.



(a) $Es=0.02$



(b) $Es=0.04$



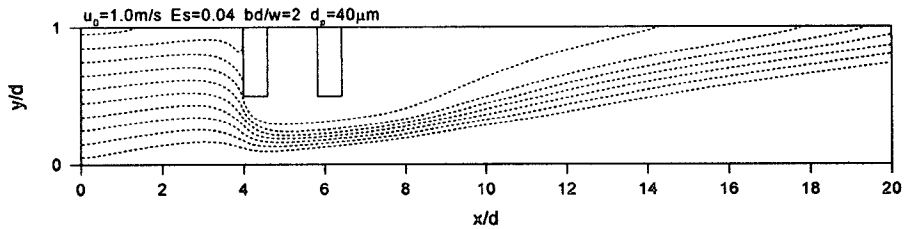
(c) $Es=0.08$

Fig. 3. Particle trajectories according to electrostatic number (Es) and particle diameter with $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$, $bd/w = 8$.
 (a) $Es = 0.02$, (b) $Es = 0.04$, (c) $Es = 0.08$.

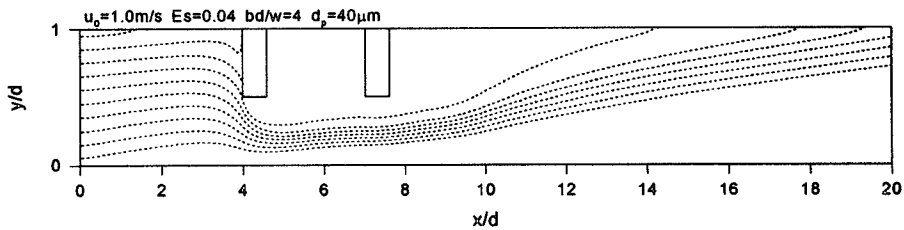
잘 따르지 못하며 재순환 영역으로의 유입은 거의 이루어지지 않고 블록 앞쪽에서의 부착이 많다. 또한 관성력에 비해 전기력의 영향을 상대적으로 작게 받기 때문에 블록을 통과한 입자는 그대로 덕트 출구를 빠져나간다. 그림 (b)에서는 블록 뒷부분에서 계속적으로 회전하는 입자를 볼 수 있다. 이는 관성력과 전기력, 어느쪽도 계속적으로 우세하지 못함으로써 나타난 결과이며, 본 연구에서는 이러한 현상을 입경이 비교적 작은 경우에서 확인할 수 있었다. 그러나 입경이 비교적 큰 경우에도 정전수가 증가하면 있을 수 있는 현상이다. 재순환 영역에 유입된 입자는 대부분 부착이 이루어지는데 이는 재순환 영역에서 속도벡터가 급격히 감소하고 상대적으로

전기력의 영향이 증가한 결과라고 할 수 있다. 벽 부근에서도 이와 유사한데 그림에서, 입구로 유입되는 입자 중 집진판에 가장 가까운 것을 예로 들면, 그림 2의 속도벡터에서 본 바와 같이 유동의 입구 유입속도는 동일하지만 하류로 흐르면서 감소한 속도벡터의 영향을 받아 상대적으로 높은 전기력에 의해 벽에 부착된다.

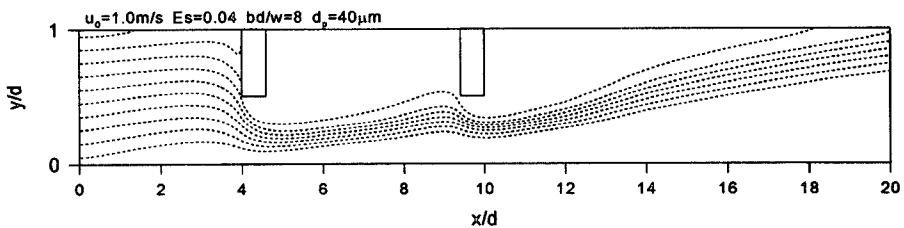
그림 4는 블록간격에 따른 입자궤적을 나타낸 것이다. 간격이 커짐에 따라 집진판의 하류쪽에 부착되는 양이 점차 감소됨을 볼 수 있다. 이것은 블록간격이 증가함에 따라 방전판과 블록사이에 형성되는 유속이 빠른 영역이, 덕트 길이방향으로 증가하여 기체와 입자의 관성이 증가되기 때문이다. 또한



(a) $bd/w=2$

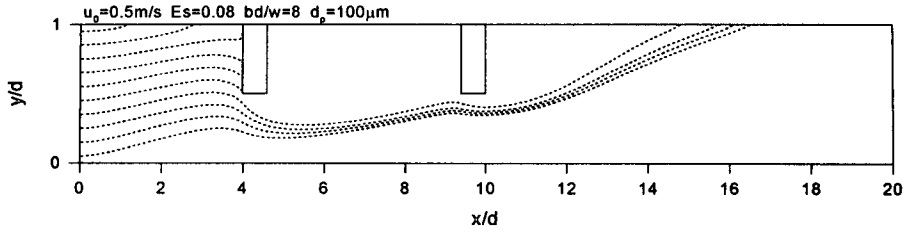


(b) $bd/w=4$

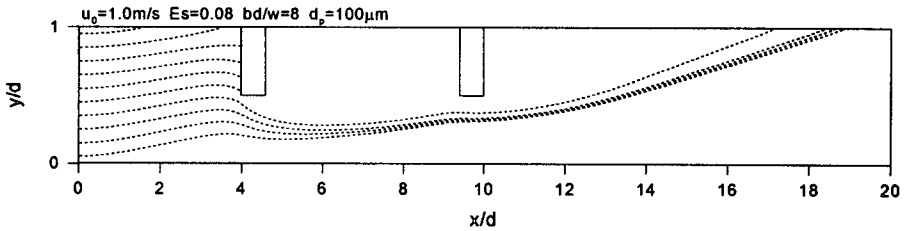


(c) $bd/w=8$

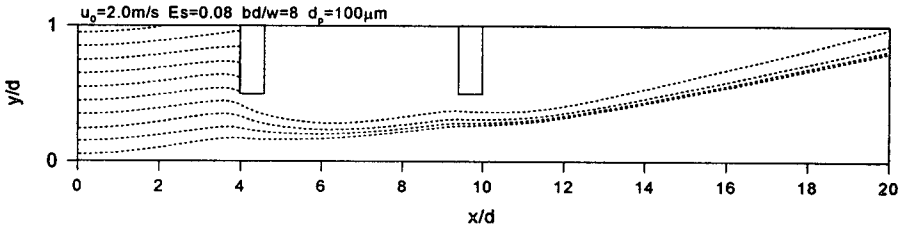
Fig. 4. Particle trajectories according to block distance with $u_0 = 1.0$ m/s, $Es = 0.04$, $d_p = 40 \mu\text{m}$. (a) $bd/w = 2$, (b) $bd/w = 4$, (c) $bd/w = 8$.



(a) $u_0=0.5\text{m/s}$



(b) $u_0=1.0\text{m/s}$



(c) $u_0=2.0\text{m/s}$

Fig. 5. Particle trajectories according to inlet mean velocity with $Es=0.08$, $bd/w=8$, $d_p=100\ \mu\text{m}$. (a) $u_0=0.5\ \text{m/s}$, (b) $u_0=1.0\ \text{m/s}$, (c) $u_0=2.0\ \text{m/s}$.

고전압판 근처에 있는 입자들이 두 블록사이에서 전기력에 의해 y방향으로의 이동이 어느정도 있었으나, 블록간격의 증가에 비해 매우 미약하고, 두 번째 블록을 빠져나온 이후 입자가 받는 전기력에 의한 집진판으로의 궤적의 기울기는 유사하여, 상대적으로 짧아진 집진판에 부착되는 양이 감소하게 되었다.

그림 5는 입구 유입속도에 따른 입자궤적을 나타낸 것이다. 입자의 크기가 크고, 유입속도가 증가함에 따라 입자의 관성력이 증가하므로 재순환 영역으로의 유입은 거의 이루어지지 않고 있으며, 하류쪽의 입자궤적이 상당히 완만해졌다. 이 때문에 집진판에서의 부착이 감소하고 덕트를 빠져나가는 입

자의 양이 많아졌다. 그림 4에서 블록간격의 증가가 하류쪽에서의 입자부착에 불리하게 작용함을 보였는데, 그림 5에서도 이를 확인할 수 있다.

그림 6은 입자크기에 따른 입자궤적을 나타낸 것이다. 그림에서 입경이 $10\ \mu\text{m}$ 인 경우는 유선을 잘 따르며, 재순환 영역내에서 감소한 속도에 의해 전기력의 영향을 받아 부착된 것을 볼 수 있다. 입경이 $20\ \mu\text{m}$ 인 경우에는 전기력에 의해 재순환 영역내로 깊숙히 유입되었으나 결국 유선을 따라 흐르면서 관성에 의한 부착이 두 번째 블록 앞면($x/d=9.4$)에서 이루어졌다. 입경이 $30\ \mu\text{m}$ 인 경우는 입자의 관성력에 비해 전기력이 상대적으로 약해지면서 재순환 영역내로의 유입이 미약하게 되고, 부착은

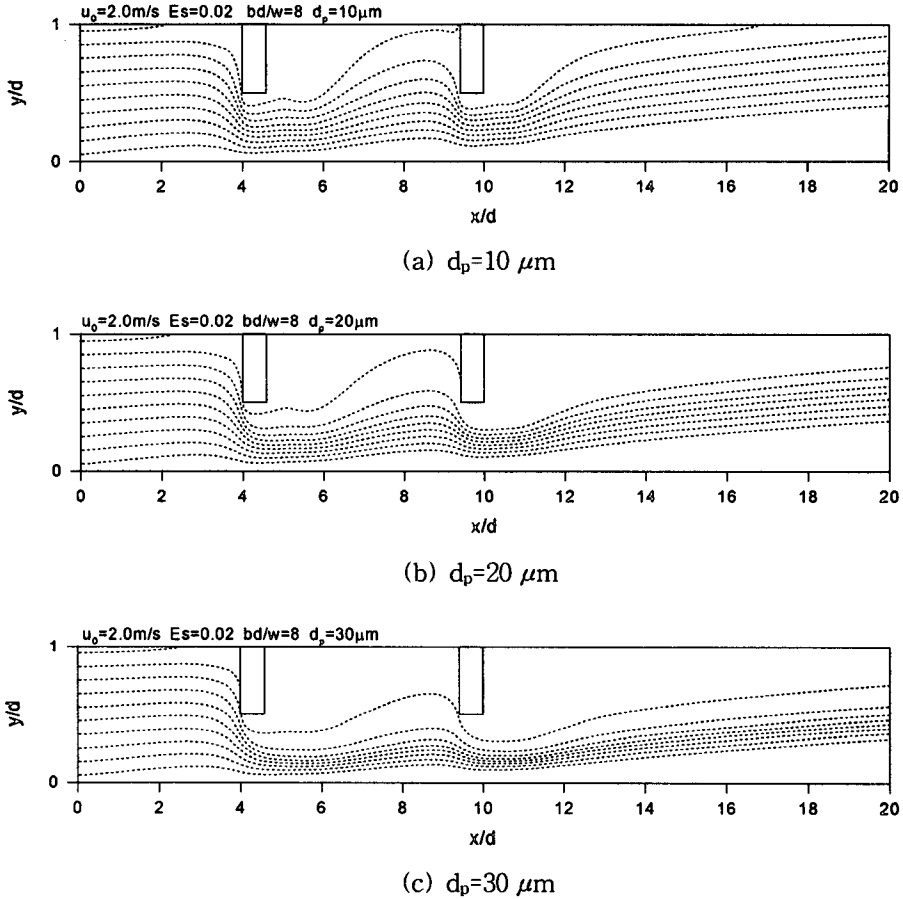
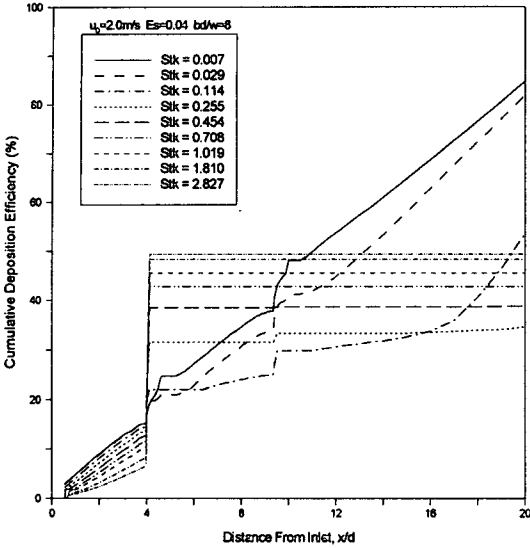


Fig. 6. Particle trajectories according to particle diameter with $u_0 = 2.0 \text{ m/s}$, $Es = 0.02$, $bd/w = 8$. (a) $d_p = 10 \mu\text{m}$, (b) $d_p = 20 \mu\text{m}$, (c) $d_p = 30 \mu\text{m}$.

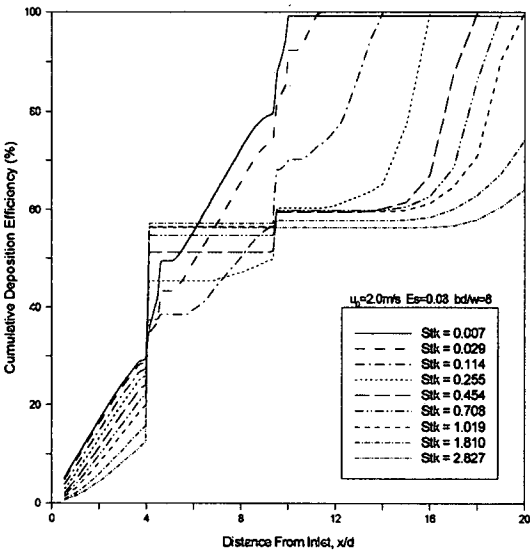
관성력에 의해 첫 번째 블록 앞에서 주로 이루어지고 있다. 따라서 전기력의 영향에 의한 입자부착이 관성력의 영향에 의한 부착으로 바뀌어가며, 20 μm 인 경우가 부착량이 가장 작음을 입자의 궤적을 통해 쉽게 짐작할 수 있다. 입경이 더욱 커질수록 재순환 영역으로의 유입은 점점 더 어려워지게 될 것이다. 전기력과 관성력의 변화는 재순환 영역으로의 입자유입 정도로 확인이 가능하다.

그림 7은 입자크기에 따른 누적 부착효율을 나타낸 것이다. 누적 부착효율의 기울기가 급격한 영역은 입자 부착이 많음을 의미하며 기울기가 완만한 영역은 입자 부착이 많지 않음을 뜻한다. 그림 (a)의 경우, Stokes수가 비교적 작은 경우에 덕트 길이방

향으로 골고루 부착이 되고 있다. 그림 (b)는 Stokes 수 0.007, 1.810 그리고 2.827인 경우를 제외하고는 정전수가 높기 때문에 대부분의 입경에서 100%의 누적 부착효율을 나타낸다. Stokes수가 0.007 ($d_p = 5 \mu\text{m}$)일 때, 누적 부착효율이 100%에 근접하지만 100%에 도달하지 못하는 이유는 그림 3의 (b)에서 설명한 바와 같이, 재순환 영역으로 유입되는 입자에 관성력과 전기력이 비슷한 영향력으로 작용하여 집진판에 부착되지 못하고 계속 재순환 영역에 머무르고 있는 입자들이 존재하기 때문으로 설명할 수 있다. Stokes수가 1.810 ($d_p = 80 \mu\text{m}$), 2.827 ($d_p = 100 \mu\text{m}$)인 경우는 입경이 커짐에 따른 관성효과의 영향때문이다. 입자부착 변화를 보면, 첫 번째 블록



(a) $Es=0.04$



(b) $Es=0.08$

Fig. 7. Cumulative deposition efficiency along the longitudinal direction for (a) $Es = 0.04$, (b) $Es = 0.08$.

앞면 ($x/d=4$)에서 많은 입자가 부착되어 누적 부착 효율이 급격히 상승하였으나, 두 번째 블록 앞면 ($x/d=9.4$)에서는 약간의 효율상승만이 있을 뿐이며, 이후에 입자가 부착되는 선도의 기울기도 상당히

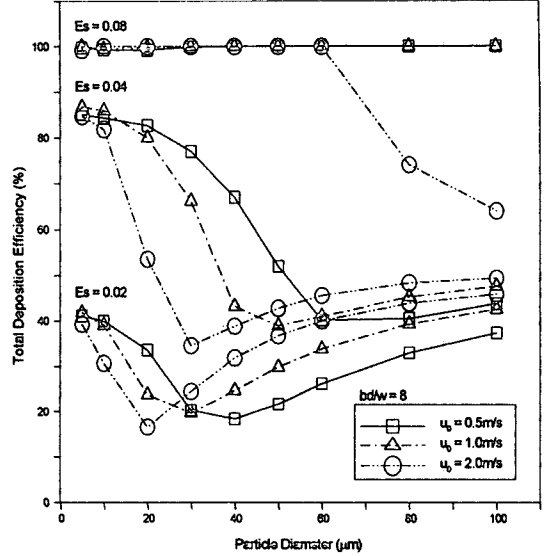


Fig. 8. Total deposition efficiency according to inlet mean velocity, electrostatic number (Es) and particle diameter with $bd/w = 8$.

완만해졌다. 이는 그림 5와 그림 6에서 설명한 바와 같이 입자가 커져 재순환 영역으로의 유입이 어렵고, 입자궤적이 완만해져서 하류쪽에서의 부착이 감소하고 덕트를 빠져나가는 양이 많아져서 생긴 결과이다. 따라서 입경이 더욱 증가하면 첫 번째 블록에서만 부착이 이루어지고 부착효율도 50%까지 감소할 것으로 예상할 수 있다.

그림 8은 블록간격이 8인 경우, 유입속도, 정전수, 입자크기에 따른 총 부착효율을 나타낸 것이다. 정전수가 증가함에 따라 모든 입경에서 부착효율이 증가하며, 정전수 0.02, 0.04에서 부착효율이 최소화 되는 입경, 즉 최소효율입경 (minimum efficiency particle diameter)이 존재함을 알 수 있다. 또한 일정한 정전수에 대하여 입구의 유입속도가 증가할수록 최소효율입경은 작아졌다. 최소효율입경은 입경이 커짐에 따른 전기력과 관성력의 상대적 영향력의 변화에 의해 나타난 결과라고 할 수 있다. 최소효율입경에서 두 영향력이 평형을 이루게 되며 최소효율입경보다 입경이 커지면 관성력의 영향이 점점 더 증가하게 된다. 따라서 그림 7에서 본 바와 같이 입경이 커짐에 따른 입자부착은 블록 앞면에서 대부분을 차지하게 된다. 최소효율입경과 이에 근접한

입경을 가진 입자들의 궤적은 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 또한 그림 8에서, 입경이 비교적 작은 경우에는 속도가 작을수록 부착효율이 높은 반면, 입경이 비교적 큰 경우에는 속도가 클수록 부착효율이 높게 나타난다. 이러한 현상에서, 입경이 작은 경우에 대한 입자의 주된 부착 메카니즘은 전기력이나, 입경이 큰 경우의 주된 부착 메카니즘은 관성

력이라는 사실을 알 수 있고, 그림 9의 입자의 궤적을 통해 확인할 수 있다. 입경이 20 μm 인 경우를 보면, 그림 (a)에서 보는 바와 같이, 속도가 0.5 m/s인 경우에는 관성의 영향보다 전기력의 영향이 상대적으로 높고 체류시간(residence time)도 길어져서 부착이 이루어질 확률이 높다. 그러나 그림 (b)에서 보는 바와 같이, 속도가 증가하게 되면 전기력의 영향

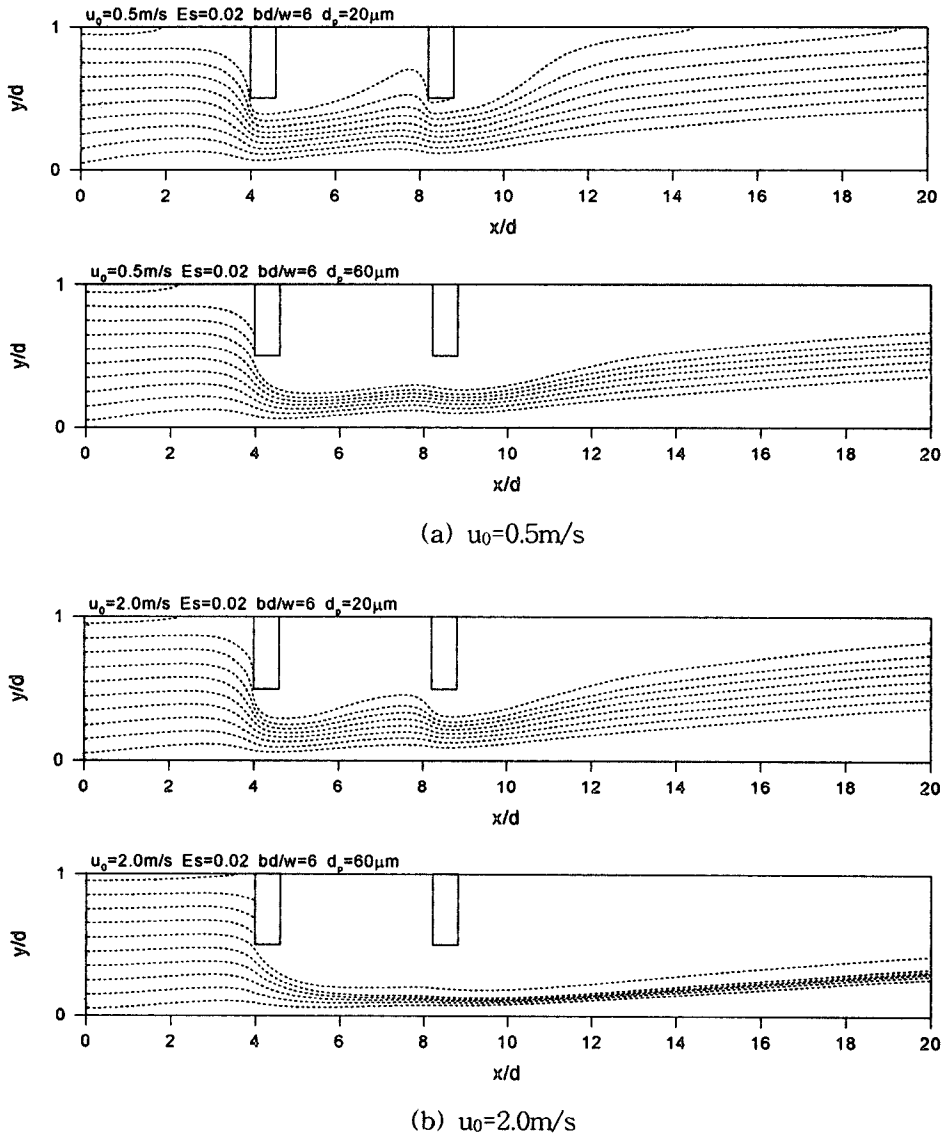


Fig. 9. Particle trajectories according to inlet mean velocity and particle diameter with $Es = 0.02$, $bd/w = 6$. (a) $U_0 = 0.5$ m/s, (b) $U_0 = 2.0$ m/s.

보다 관성력의 의존도가 높아져서 입자는 첫 번째 블록 앞면에서의 부착은 있었지만, 하류쪽에서의 부착은 거의 없다. 입경이 60 μm인 경우에는 첫 번째 블록 이후에는 부착이 거의 이루어지지 않는다. 이는 입자가 커짐에 따라 입자의 관성이 증가하여 유선을 잘 따르지 못한 결과라고 볼 수 있다. 따라서 비교적 큰 입자에서 (60 μm) 전기력의 영향이 매우 크지 않을 경우에는, 부착효율을 높이기 위해서는 첫 번째 블록에서의 부착이 많아져야 함을 알 수 있는데, 속도가 증가할수록 관성력에 의한 부착이 증가하여 부착효율이 높아지는 것이다. 그러나 관성력이 아무리 증가하더라도 본 연구에 적용된 블록의 높이가 덕트폭의 1/2이므로 최소효율입경보다 큰 입자에 대한 부착효율은 50%를 넘지 못하게 된다.

그림 10은 입구유입속도가 0.5 m/s인 경우, 정전수, 블록간격, 입자크기에 따른 총 부착효율을 나타낸 것이다. 블록간격이 증가함으로써 부착효율의 변화가 있음이 확인된다. 그림에서 정전수가 0.02, 0.04인 경우, 일정한 입경에 대하여 블록의 간격이 증가함에 따라 부착효율이 감소하는 경향을 보인다. 그리고 최소효율입경보다 큰 입자의 경우는 블

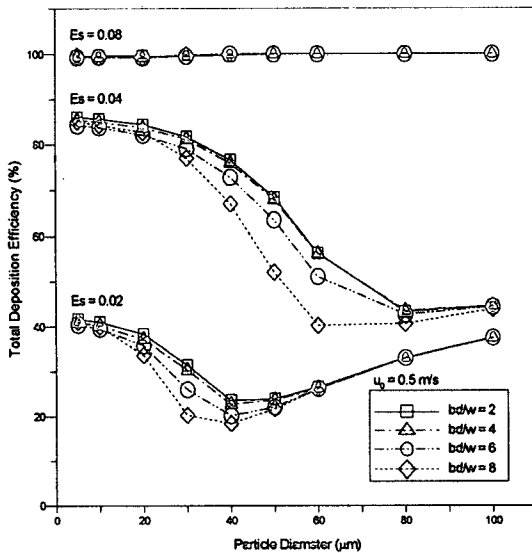


Fig. 10. Total deposition efficiency according to electrostatic number (Es), block distance and particle diameter with $u_0 = 0.5$ m/s.

록간격이 부착효율에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 그림 4에서 설명한 바와 같이, 두 번째 블록을 빠져나온 입자가 부착을 위해 유사한 궤적의 기울기로 집진판을 향해 이동하지만 상대적으로 감소한 하류쪽의 집진판 길이 때문에 부착이 되지 못하고 집진부를 빠져나간 결과라고 할 수 있다. 그러나 정전수가 0.08로써 전기력의 영향이 매우 큰 경우에는 블록의 간격변화와 입자 크기에 따른 영향이 없음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는, 2단식 전기집진기에 대하여 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도, 정전수, 블록의 간격 및 입자직경에 따른 입자의 이동현상과 집진 효율에 관한 수치해석적 연구가 수행되었다. 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 정전수가 증가하면 모든 입경의 부착효율을 증가시킨다. 또한 일정한 정전수에서 입구 유입속도가 증가할수록 최소효율입경은 작아진다.
- 2) 입경이 비교적 작은 경우, 즉 최소효율입경보다 작은 경우, 입자의 주된 부착 메커니즘은 전기력이고, 입경이 비교적 큰 경우, 즉 최소효율입경보다 큰 경우의 주된 부착 메커니즘은 관성력이다. 따라서 입경이 비교적 작은 경우에는 입구 유입속도가 작을수록 부착효율이 높은 반면, 입경이 비교적 큰 경우에는 입구 유입속도가 클수록 부착효율이 높게 나타난다.
- 3) 입경이 작으면 전기력의 영향을 쉽게 받고 비교적 관성력이 작으므로 유선의 흐름에 잘 적응하기 때문에 블록간격의 영향이 입자의 궤적에 거의 영향을 미치지 않으며, 입경이 크면 상류쪽 블록 앞면에서의 부착이 지배적이기 때문에 블록간격의 영향이 부착효율에 거의 영향을 미치지 않는다. 그러나 최소효율입경에 근접하는 입경은 블록간격이 증가함에 따라 부착효율이 쉽게 감소한다.

참 고 문 헌

Chang, C.L. and H. Bai (1999) An experimental study on the performance of a single discharge wire-plate elec-

- trostatic precipitator with back corona, *J. Aerosol Science*, 30, 325-340.
- Crabb, D., D.F.G. Durao, and J.H. Whitelaw (1977) Velocity characteristics in the vicinity of a two dimensional rib, *Proceedings the 4th Brazilian Congress on Mechanical Engineering*, Florianopolis, Brazil.
- Crawford, M. (1976) *Air Pollution Control Theory*, McGraw-Hill, New York.
- Crowe, C.T. (1982) Review-numerical models for dilute gas-particle flows, *Trans. ASME, J. Fluids Eng*, 104, 297-303.
- Crowe, C.T. and D.E. Stock (1976) A computer solution for two-dimensional fluid-particle flows, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 10, 185-196.
- Dalmon, J. and H.J. Lowe (1961) *Proc. Int. Symp. on Physics of Electrostatic Forces and Their Applications*, Grenoble, France.
- Hinds, W.C. (1982) *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York.
- Jeong, S.H. and S.S. Kim (1998) A study on the electrohydrodynamic flow in a rectangular impactor with positive corona discharge, *Aerosol Science and Technology*, 29, 1-16.
- Lauder, B.E. and D.B. Spalding (1974) The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269-289.
- Leonard, G.L., M. Mitchner, and S.A. Self (1982) Experimental study of the effect of turbulent diffusion on precipitator efficiency, *J. Aerosol Science*, 11, 271-284.
- McLean, K.J. (1988) Electrostatic precipitators, *IEE Proceedings*, 135, 347-361.
- Park, S.J. (1999) Effect of turbulent diffusion on particle transport and collection efficiency in electrostatic precipitators with cavity walls, Ph.D. Thesis, KAIST.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- Reist, P.C. (1992) *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill, New York.
- Suh, Y.J. and S.S. Kim (1996) The effect of obstructions on the particle collection efficiency in a two-stage electrostatic precipitator, *J. Aerosol Science*, 27, 61-74.
- Yamamoto, T. and H.R. Velkoff (1981) Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator, *J. Fluid Mech*, 108, 1-18.
- Yoo, K.H., J.S. Lee, and M.D. Oh (1997) Charging and collection of submicron particle in two-stage parallel-plate electrostatic precipitators, *Aerosol Science and Technology*, 27, 308-323.