

평판형 방전판을 갖는 2단식 전기집진기의 집진판 블록배열이 집진효율에 미치는 영향

Effects of the Block Arrangement on the Collection Efficiency in the Two-Stage Electrostatic Precipitator with Charging Plate

박 성 호 · 박 청 연¹⁾ · 김 태 권²⁾

경일대학교 기계공학부, ¹⁾경일대학교 환경열공학연구실, ²⁾계명대학교 자동차공학부

(2000년 6월 27일 접수, 2000년 11월 20일 채택)

Sung Ho Park, Chung Yeon Park¹⁾ and Tae Kwon Kim²⁾

Department of Mechanical Engineering, Kyungil University

¹⁾Thermo-Environmental Engineering Laboratory, Kyungil University

²⁾Department of Automotive Engineering, Keimyung University

(Received 27 June 2000; accepted 20 November 2000)

Abstract

The effect of block arrangement has been investigated on the particle deposition in the specified collecting cell of two-stage electrostatic precipitator by numerical analysis. Recirculation zone existed at the downstream of the block in the collecting cell, and the particles entering the recirculation zone were mostly deposited on the collecting plate. Particle trajectory and deposition had considerably different phenomenon according to electrostatic and inertial effect, which depended on inlet mean velocity, electrostatic number, and particle diameter in the collecting cell. The total collection efficiency reached a minimum value through an interaction of electrostatic and inertial effect. In the computational domain, total collection efficiency for the case of two blocks in the computational domain was more than that of one block at the relative small electrostatic number. However as the block distance and inertial effect increased, the difference between the collection efficiency of two cases decreased. In the range of relatively small particle size, total collection efficiency was always superior to particle collection efficiency that was predicted by Deutsch equation.

Key words : recirculation zone, electrostatic number, block distance, total collection efficiency, Deutsch equation

1. 서 론

기체 중에 부유된 입자를 제거하는 한 방법으로

이용되고 있는 전기집진기에 대한 이론적 기초는 Deutsch가 집진효율에 관한 식을 유도하면서 확립되었다. 상기 이론은 균일 전기장하에서 기체와 입자는 수직 혼합없이 덕트 길이방향으로 일정 속도로

이동하고, 임의의 단면에서의 입자의 농도분포는 균일하다고 가정하였다. 그러나 실제 전기집진기의 집진과정은 Deutsch의 이론과는 많은 차이점을 보이고 있기 때문에 문제해결을 위한 새로운 이론이나 모델들이 제시되고 있는데, 입자의 하전과 집진이 동일한 곳에서 이루어지는 1단식(one-stage) 전기집진기에 대한 정전유체역학(ElectroHydroDynamics)적 유동(Yamamoto and Velkoff, 1981), 집진효율을 저하시키는 원인인 입자의 비저항(resistivity)에 의한 역 코로나(back corona)현상(Chang and Bai, 1999; Mclean, 1988; Patel *et al.*, 1985)이 대표적이다. 입자의 하전과 집진이 각각 독립적으로 이루어지는 2단식(two-stage) 전기집진기에 대한 연구에서, Yoo *et al.*(1997)은 대표적인 이론적 모델들을 하전부와 집진부에 적용하여 집진특성을 종합적으로 분석할 수 있는 이론적 해석방법을 제시하였다. Suh and Kim (1996)은 집진부에 블록(block)을 설치하여 Deutsch 효율식과 비교한 연구에서 장애물(obstruc-

tion)의 존재가 언제나 집진효율을 저하시키는 것이 아님을 수치해석적으로 분석하였다. 또한 박성호와 박청연(2000)은 전기력과 관성력의 영향에 의해 집진부에 설치된 블록간격이 증가함에 따라 집진효율이 감소하게 되는 입경영역이 존재함을 보였다.

입자의 하전과 집진이 독립적으로 이루어지는 2단식 전기집진기의 경우, 하전부에서 하전된 입자는 집진부로 유입되어 고전압이 부가되는 방전판에 의해 형성된 전기장의 영향을 받아 집진판으로 이동하여 부착이 이루어진다. 집진판은 그 형상이 매우 다양하여 사용되는 전기집진기의 특성에 따라 offset형, baffle형, trapezoidal형 등으로 나눌 수 있다(Oglessby and Nichols, 1978). 2단식 전기집진기에 대한 기존의 연구에서, 집진부의 해석을 위해 블록을 한 개 또는 두 개 설치하여 이들 각각의 경우가 집진효율에 미치는 영향에 대하여 연구한 바가 있다(박성호와 박청연, 2000; Suh and Kim, 1996). 그러나 지정된 집진부 내에서 입자의 흐름에 영향을 미치는

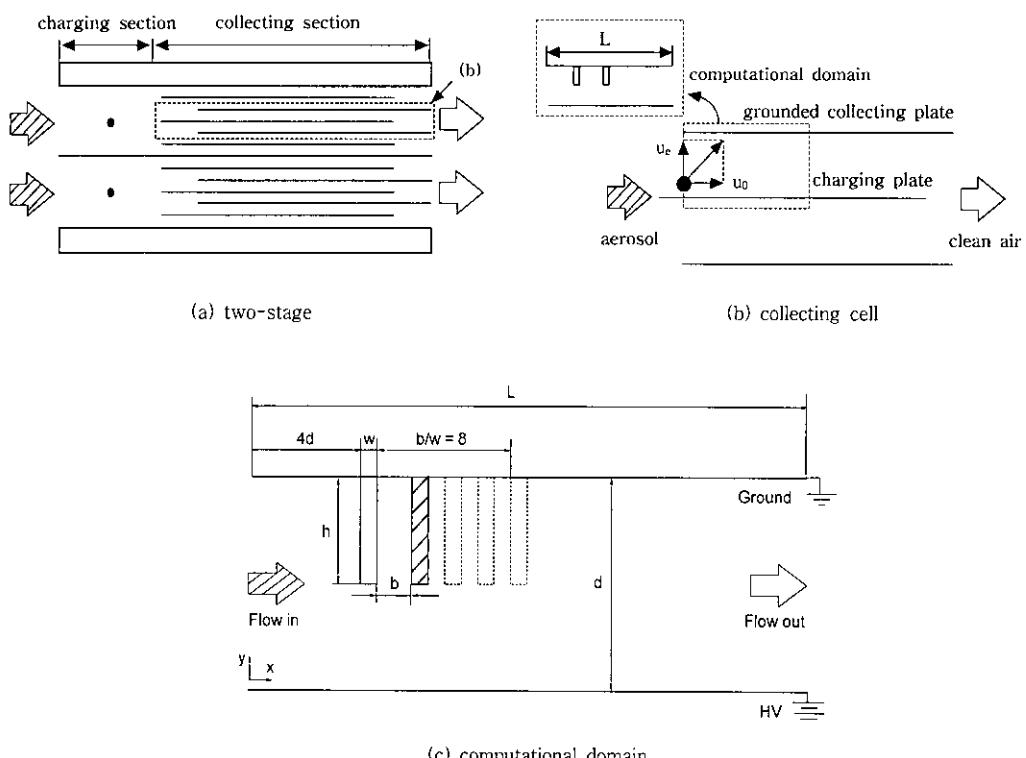


Fig. 1. Schematic diagram of typical two-stage electrostatic precipitator.

블록배열에 따른 정량적인 비교, 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2단식 전기집진기의 집진부의 해석을 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 해석하고자 하는 집진부 영역을 지정하고, 상류블록의 영향만 받는 경우(계산영역 내에 블록이 한 개 존재하는 경우)와 상류블록과 하류블록의 영향을 함께 받는 경우(계산영역 내에 블록이 두 개 존재하는 경우)로 나누어 두 경우에 대한 입자의 이동 및 집진효율을 수치 해석적 연구를 수행하였다. 수치해석을 통하여 2단식 전기집진기 내에서 입자의 이동 궤적 및 집진효율을 정량적으로 비교, 분석하므로써 전기집진기 집진판의 블록배치에 대한 설계자료 및 설계기술 개발에 활용하고자 한다.

2. 이론적 배경

2. 1 지배방정식

2. 1. 1 전기장 (electric field)

전류발생의 원인이 되는 공간전하는 입자가 갖고 있는 전하와 기체중의 이온에 의해 형성된다. 단분산(monodisperse) 입자의 경우, 한 입자의 전하량과 수농도(number concentration)에 비례하여 이는 유동장과 전기장에 영향을 미치게 된다. 공간전하밀도가 존재하는 경우, 전기장에 대한 방정식은 Poisson 방정식으로 나타내며, 그 식은 다음과 같다(Yamamoto and Velkoff, 1981).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i^2} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (1)$$

여기서, V 는 정전위(electrostatic potential), ρ_c 는 공간전하밀도(space charge density), ϵ_0 는 자유공간유전율(permittivity of free space, $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)이다.

본 연구에서는 집진부에 대하여 낮은 입자 수농도($10^7 \text{ particles/m}^3$)가 가정된다. 그 결과 일방연계(one-way coupling)가 적용되며(Crowe, 1982), 전기장하에서 입자전하의 영향은 무시할 수 있다. 또한 이온은 코로나 방전이 없는 경우에는 존재하지 않는다고 가정함으로써 전기장에 대한 방정식(1)은 Laplace 방정식으로 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다(Suh and Kim, 1996).

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i^2} = 0 \quad (2)$$

전기장강도(electric field strength)는 다음과 같다.

$$E_i = - \frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (3)$$

입구와 출구에서의 경계조건은 $\partial V / \partial x = 0$ 이 적용되며, 집진판에서는 접지되어 0(zero)이다.

2. 1. 2 유동장 (flow field)

정상유동인 경우, 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u_i u_i}{\partial x_i} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u_i} \bar{u'_j} \right] \quad (5)$$

여기서, u_i 는 기체의 평균속도(mean velocity of gas), ρ 는 기체밀도(density of gas, 1.18 kg/m^3), μ 는 기체의 점성계수, u'_j 는 기체의 변동속도(fluctuating velocity of gas), $-\rho \bar{u_i} \bar{u'_j}$ 는 레이놀즈응력(Reynolds stress)이다.

레이놀즈응력에 대한 계산을 위해 본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다. 표준 $k-\epsilon$ 모델은 유선곡률이 심한 2차원과 3차원에 대한 유동의 해석에서는 유동특성을 정확히 예측하지 못한다고 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 유동형태가 비교적 단순한 2차원 유동이며 입자의 크기가 $5 \mu\text{m}$ 에서 $100 \mu\text{m}$ 까지의 비교적 큰 입자를 대상으로 하고 있다. 따라서 대부분의 입자들이 관성력이 커서 블록뒤에서 발생되는 재순환 영역(recirculation zone)으로의 입자유입이 어려우므로, 본 연구에서는 유동해석의 수렴성이 우수한 표준 $k-\epsilon$ 모델(Launder and Spalding, 1974)을 적용하였고 난류 운동량방정식의 경계조건 및 난류 에너지방정식의 원천항(source term)으로써 벽마찰 응력을 구하기 위하여 벽면에 가장 가까운 격자(grid)에 대하여 벽함수(Launder and Spalding, 1974)를 적용하였다.

2. 1. 3 입자궤적 (particle trajectory)

공간전하밀도를 무시함으로써 공간전하밀도는 유동장과 전기장에 영향을 미치지 않으며, 따라서 입

자체적은 기체 유동장과 전기장을 독립적으로 계산한 이후, 수치적 통합에 의해 계산될 수 있다(Kihm *et al.*, 1987). 상기에서 설명한 바와 같이 본 연구에서의 입자의 크기가 5 μm 이상의 입자에 대한 것이므로 입자의 이완시간이 너무커서 난류의 변동성분을 충분히 따르지 못한다. 따라서 입자의 확률추적(Stochastic Particle Tracking)법을 도입하지 않고 입자는 유동의 시간평균속도를 따른다고 가정한다.

입자의 궤적을 계산하기 위하여 Lagrange접근법을 사용하였으며, 4차 Runge-Kutta적분법이 적용된다. Lagrange접근법은 입자에 대하여 다양한 힘을 작용하는 유동장에서 한 입자의 궤적을 예측하는데 유용하며, Newton의 운동법칙을 사용하여 구한 입자의 속도를 시간에 대해 적분함으로써 입자의 위치를 얻을 수 있다. 무차원화 된 입자의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Reist, 1992; Hinds, 1982).

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{C_D Re_p}{24 Stk} (u_i - u_i^p) + \frac{Es}{Stk} q E_i \quad (6)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), \quad Re_p < 1000 \quad (7)$$

$$Re_p = \frac{\rho l u_i^p - u_i | d_p }{\mu} \quad (8)$$

여기서, u_i^p 는 입자속도, C_D 는 입자의 항력계수(Crowe and Stock, 1976), Re_p 는 입자의 레이놀즈 수, d_p 는 입자의 직경, q 는 q_{field}/q_{sat} 에 의해 무차원화된 입자의 하전량을 나타내며, 전기장하전에 의한 입자의 하전량과 포화하전량에 대한 식은 다음과 같다(Hinds, 1982).

$$q_{field} = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E_{ch} d_p^2}{4q_e} \right) \left(\frac{\pi q_e Z_{ion} N_{ion} t_{ch}}{1 + \pi q_e Z_{ion} N_{ion} t_{ch}} \right) \quad (9)$$

$$q_{sat} = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \pi \epsilon_0 d_p^2 E_{ch} \quad (10)$$

여기서, q_{field} 는 전기장하전에 의한 입자의 하전량(charge number), ϵ_p 는 입자의 상대적 유전율(relative permittivity of particle, $\epsilon_p = 3.8$), E_{ch} 는 하전부에서의 전기장강도, q_e 는 전자전하(electronic charge, $1.6 \times 10^{-19} C$), Z_{ion} 은 이온의 전기 이동율(electrical ion mobility, $1.4311 \times 10^{-4} m^2/V \cdot s$), N_{ion} 은 하전부에서의

공기이온농도(ion number concentration, t_{ch})는 입자의 하전부에서의 하전시간, q_{sat} 는 포화하전량(saturation charge number)을 의미한다. 본 연구에서는 코로나 방전에 의해 입자가 미리 포화하전이 되었다고 가정하고, 입자의 크기가 1 μm 이상이므로 브라운 확산(Brownian diffusion)은 무시한다. Stokes수(Stk , Reist, 1992; Hinds, 1982)와 정전수(Es , Suh and Kim, 1996; Kihm *et al.*, 1987)에 대한 식은 다음과 같다.

$$Stk = \frac{\rho_p C_c u_0 d_p^2}{18 \mu d} \quad (11)$$

$$Es = \frac{C_c q_{sat} E_{coll}}{3 \pi \mu u_0 d_p} = \frac{u_e}{u_0} \quad (12)$$

여기서, ρ_p 는 입자의 밀도($2,350 kg/m^3$), d 는 덕트 폭, E_{coll} 은 접진부에서의 전기장강도($E_{coll} = V_0/d$), V_0 는 방전판에 부가된 전압으로써 초기값은 15 kV, u_0 는 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도이며, 입자의 초기속도는 u_0 와 같다고 가정한다. 식(12)는 아래와 같이 변형되며, 초기값 $V_0 = 15 kV$ 를 보간(interpolation)하여, 정전수에 따른 부가된 전압($V_0 = E_{coll} d$)에 대한 전기장을 얻을 수 있다(Suh and Kim, 1996).

$$E_{coll} = \frac{(\epsilon_p + 2) \mu u_0}{\epsilon_p \epsilon_0 d_p C_c E_{ch}} Es \quad (13)$$

유동이 없는 경우, 방전판에서 접진판 쪽으로의 입자의 표류속도(migration velocity)는 다음과 같이 나타낸다(Hinds, 1982; Crawford, 1976).

$$u_e = \frac{q E C_c}{3 \pi \mu d_p} \quad (14)$$

입자와 기체사이에 미끄럼(slip)을 고려하는 C_c 는 Cunningham 보정계수로서 일반적으로 다음과 같이 사용된다.

$$C_c = 1 + Kn \left[A + Q \exp \left(- \frac{b}{Kn} \right) \right] \quad (15)$$

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

덕트 길이방향으로 부착되는 입자 개수의 누적합을 입구에서 유입되는 총 입자 개수로 나눈 누적 집진효율(cumulative collection efficiency)과 계산영역 출구에서의 누적 집진효율을 총 집진효율(total collection efficiency)로 정의하여 입자가 부착되는 양을 나타내었다.

$$\eta_{cum} = \frac{\int_0^x n_{p,wall} dx}{n_{p,inlet}} \quad (16)$$

여기서, η_{cum} 은 누적 집진효율, n_p 는 입자의 수농도를 나타내며, 출구($x=L$)에서의 집진효율을 총 집진효율(η_{tot})로 정의한다. 총 집진효율은 전기집진기의 제작과 성능 평가시 널리 이용되는 Deutsch 효율식과 비교하였다. Deutsch에 의한 효율식은 다음과 같다(Kihm et al., 1985).

$$\eta = \left(1 - \exp \left(- \frac{u_e L}{u_0 d} \right) \right) \times 100 (\%) \quad (17)$$

2. 2 계산영역 (computational domain)

그림 1(c)는 본 연구에서 사용된 지정된 집진부에 대한 계산영역을 나타낸 것이다. 계산영역은 블록이 한 개인 경우와 두 개인 경우에 대하여 일정하게 유지하였다. 여기서 그림 1(c)는 지정된 집진부 내에서 블록이 두 개인 경우에 사용된 집진부의 형상이며, L 은 덕트의 길이(1m), d 는 덕트 폭(0.05 m), w 는 블록 폭(0.03 m), HV 는 부가전압, b 는 두 블록 사이의 간격, h 는 블록의 높이(0.025 m)를 의미하며, 블록의 높이는 문제의 단순화를 위해 $d/2$ 로 일정하게 유지하였다. 두 블록 사이의 간격은 b/w 로 무차원화 하였으며, 집진판은 접지(ground)되어 있다. 블록이 한 개인 경우의 블록의 위치는 블록이 두 개인 경우의 상류블록의 위치와 동일하게 두었다. 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도(u_0)와 정전수(E_s)는 각각 0.5, 1.0, 2.0 m/s와 0.02, 0.04, 0.08로 변화시켰으며, 입자(d_p)는 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 μm 를 취하여 단분산 입자 각각에 대한 유동현상과 부착효율의 관계를 알아보았다.

본 연구에서 사용된 SIMPLER 알고리즘에 의해 차분화된 방정식은 2차원 직교좌표계에서 비균일화된 각 격자(127×52)에 대한 질량 생성항의 오차에 대한 만족도가 10^{-6} 보다 작으면 수렴한 것으로 간

주하였다(Patankar, 1980). 또한 난류 유동장 해석용 프로그램을 검증하기 위하여 유동방향 평균속도의 계산결과를 Crabb et al.(1977)의 실험결과와 비교한 바, 잘 일치함을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 지정된 집진부 내에서 상류블록의 영향만 고려한 경우(계산영역 내에 블록이 한 개 존재하는 경우, Case 1)와 상류블록과 하류블록의 영향을 함께 고려한 경우(계산영역 내에 블록이 두 개 존재하는 경우, Case 2)에 대한 정전위분포를 나타낸 것이다. 여기서 Case 2의 블록간격은 $b/w=2$ 와 $b/w=8$ 이다. 그림에서 보는 바와 같이 정전위 분포는 두 경우 모두 방전판에서 집진판쪽으로 선형적인 감소를 보이고 있으며, 집진판은 접지되어 있으

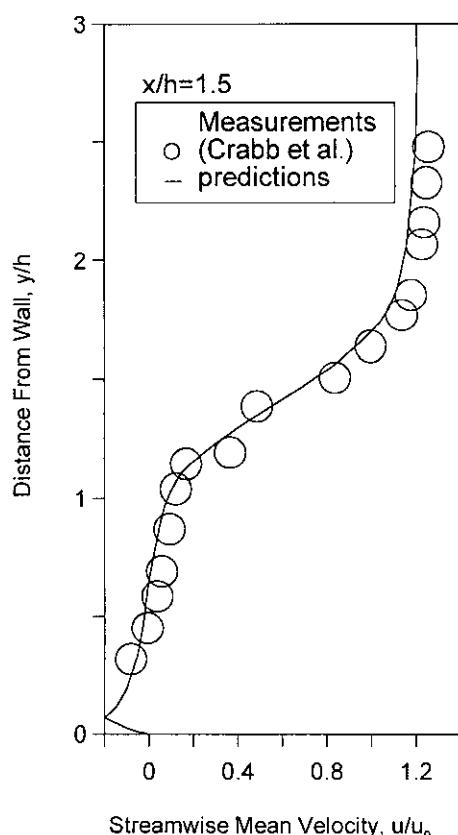


Fig. 2. Comparison of gas flow field between present prediction and experimental results.

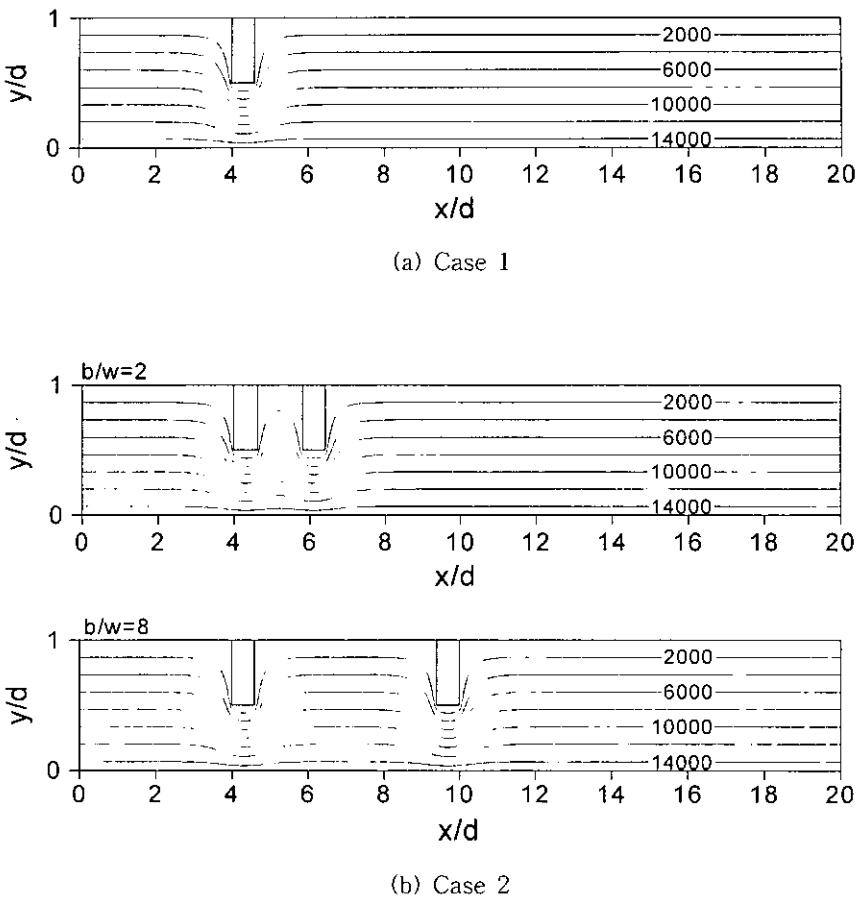


Fig. 3. Electrostatic potential distribution.

므로 정전위 값은 0(zero)이 된다. 또한 블록부근에서 정전위 분포의 구배(gradient)가 급격해짐을 알 수 있다.

그림 4는 Case 1과 Case 2에 대하여 조건이 같은 경우, 즉 유입속도가 2.0 m/s이고 정전수가 비교적 높은 0.08, 입경이 100 μm인 경우에 대한 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 4를 통하여 블록간격의 영향이 입자 부착량에 미치는 영향을 설명할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Case 1에서는 모든 입자가 집진판에 부착되었음을 알 수 있다. 그러나 Case 2의 경우는 지정된 계산영역 내에 부착되지 않고 덕트 출구를 빠져나가는 입자 궤적이 존재한다. 또한 블록간격이 $b/w=8$ 로 증가함에 따라 집진판에 부착되지 못하고 덕트 출구를 빠져나가는 입

자 궤적의 수가 많아졌다. 그 이유는 입경이 비교적 큰 경우에는 관성력이 전기력보다 우세하게 되어 블록뒷면의 재순환 영역으로의 유입이 어려워진다. 이때의 입자부착은 두 경우 모두 상류블록 앞면과 하류쪽 집진판의 길이에 의해 좌우된다. Case 2의 경우는 블록간격이 존재하며, $b/w=8$ 인 경우는 $b/w=2$ 인 경우에 비해 블록간격만큼 하류쪽 집진판의 길이가 더욱 짧아졌다. 따라서 집진부 내에서 입자 체류시간이 작아서 덕트출구를 빠져나가는 입자수는 많아진다.

그림 5는 기체의 평균 유입속도가 0.5 m/s이고 정전수 0.04에서 입경 5 μm와 80 μm인 경우, Case 1과 Case 2에 대한 입자 부착량을 예측하기 위한 그림이다. 유동은 덕트를 통과할 때, 입구에서 균일하게

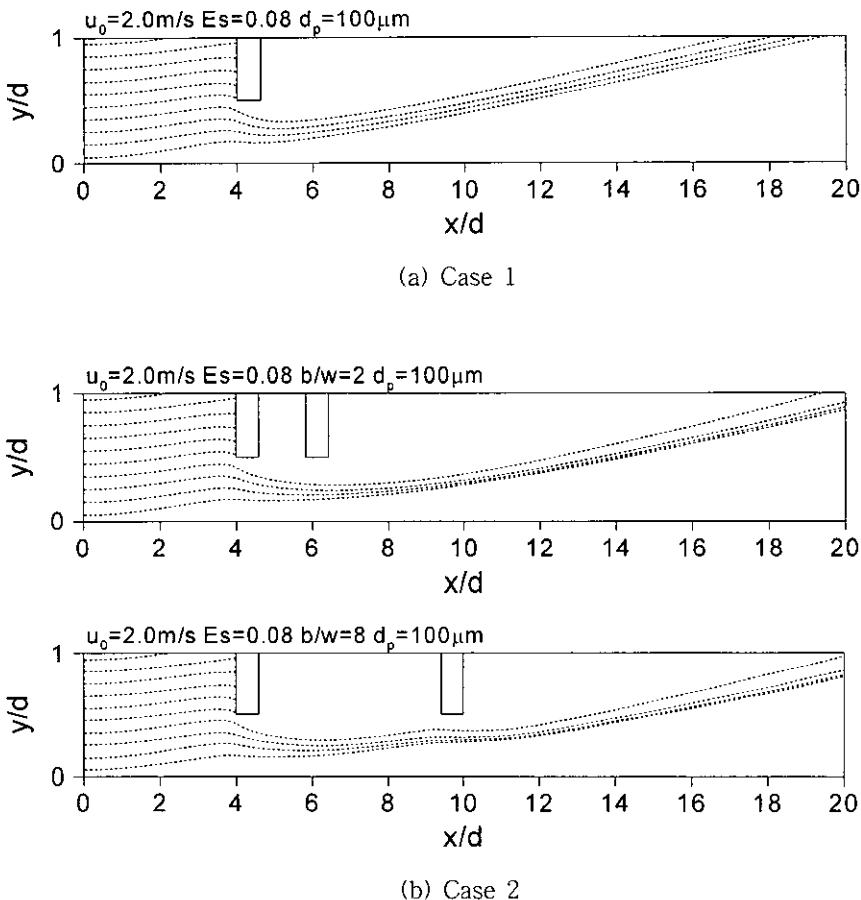


Fig. 4. Particle trajectories for one block case (Case 1) and two blocks case (Case 2) at $u_0 = 2.0 \text{ m/s}$, $Es = 0.08$, $d_p = 100 \mu\text{m}$.

유입되지만 벽에서 작용하는 전단력에 의해 벽 부근과 재순환 영역에서의 속도벡터는 점차 감소하는 성질이 있다(Suh and Kim, 1996). 입경이 비교적 작은 $5 \mu\text{m}$ 입자의 경우를 보면, 관성력의 영향이 작고 정지거리(stopping distance)가 짧기 때문에 쉽게 기류의 변화에 적응(Hinds, 1982)하여 재순환 영역으로의 유입이 나타났다. 이로써 벽부근과 재순환 영역에 유입된 입자는 상대적으로 강한 전기력을의 영향을 받게 되면 쉽게 부착이 이루어질 수 있음을 짐작할 수 있는데, 그림 5에서 보는 바와 같이 Case 2의 경우에는 블록의 뒷부분에서 생성되는 재순환 영역이 두 개이며 벽의 범위도 넓으므로 부착되는 입자의 양이 Case 1에 비해 많을 것으로 예측할 수

있다. 또한 입경이 비교적 작은 경우의 주된 부착 메카니즘은 전기력인데(박성호와 박청연, 2000; Suh and Kim, 1996), 그림 3에서 보는 바와 같이 Case 2는 Case 1에 비해 블록 끝단과 방전판 사이를 지나는 입자가 방전판의 강한 전기력을 받을 수 있는 범위가 크기 때문에 집진판 쪽으로의 케적의 기울기가 증가하여 집진판에서의 입자 부착이 많을 것으로 예측할 수도 있다. 입경이 비교적 큰 $80 \mu\text{m}$ 입자의 경우에는 앞에서 설명한 바와 같이 재순환 영역으로의 유입이 어렵고 관성력의 영향에 의한 입자부착이 지배적이기 때문에 두 경우에 대한 부착되는 입자의 양은 거의 유사할 것으로 예측할 수 있다. 따라서 정전수가 비교적 낮은 경우, 입경이 작

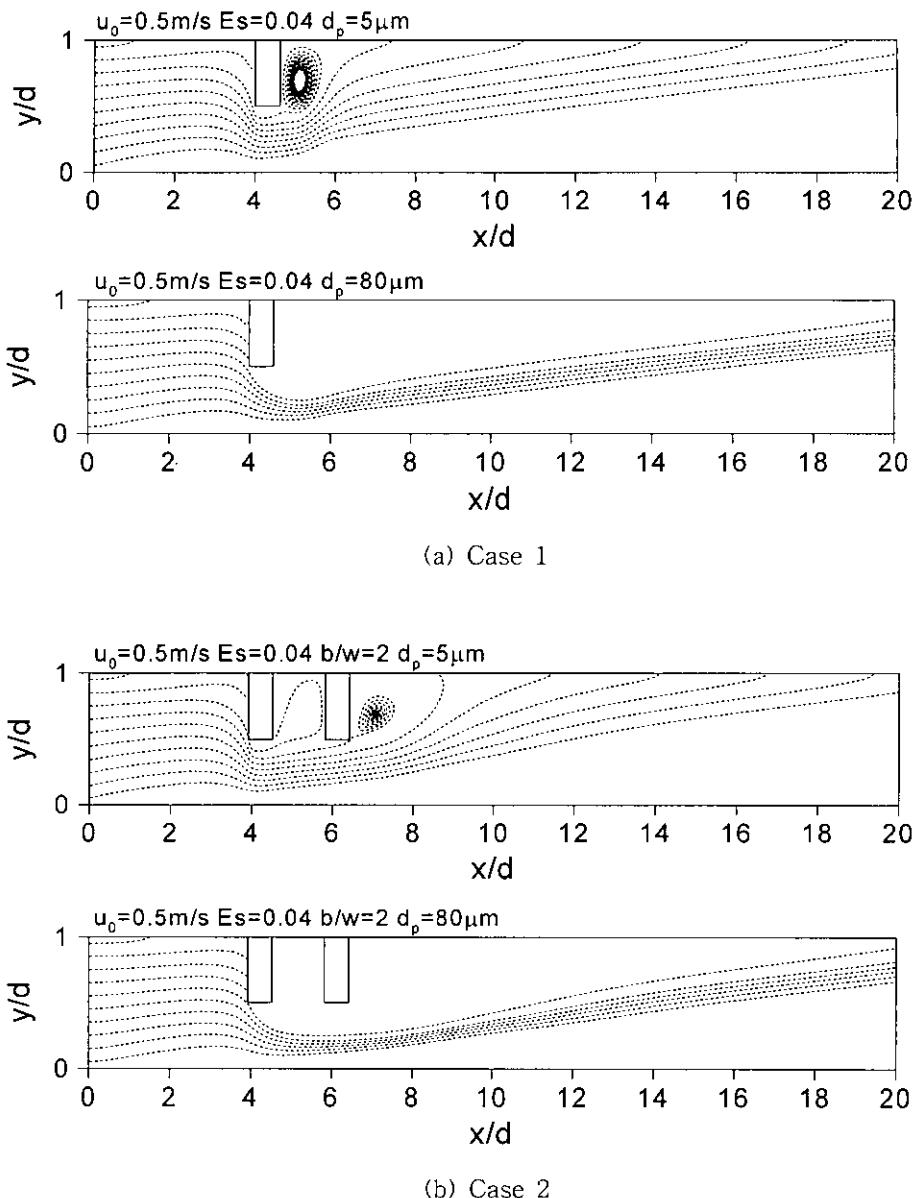


Fig. 5. Particle trajectories for one block case (Case 1) and two blocks case (Case 2) at $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$, $Es = 0.04$.

을수록, 즉 전기력의 영향에 민감하게 작용하는 입자일수록 두 경우에 대한 집진효율의 차이는 증가하고, 입경이 커질수록, 즉 관성력의 영향이 증가할 수록 두 경우에 대한 집진효율의 차이는 감소할 것이라고 말할 수 있다.

그림 6은 Case 1과 Case 2에 대한 입자크기에 따

른 누적 집진효율 (cumulative collection efficiency)을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 정전수가 비교적 높은 0.08에서 Stokes수 0.007 ($d_p = \mu\text{m}$)인 경우에 재순환 영역에서 계속적으로 회전하는 입자가 존재하기 때문에 100%의 집진효율을 나타내지는 못하지만, Case 1은 Case 2와는 달리 이를 제외한 모든 Stokes

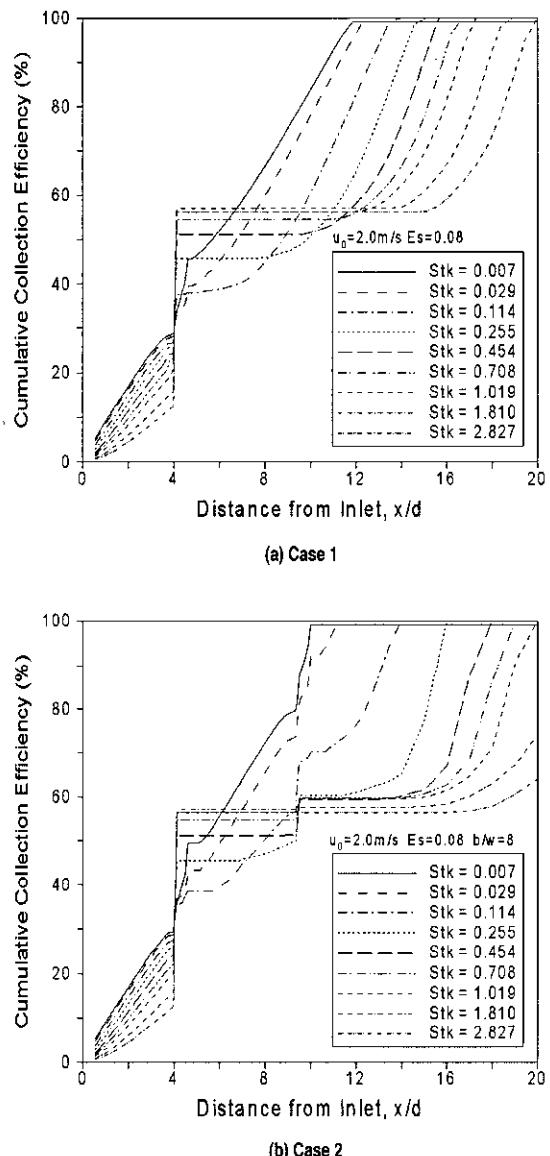


Fig. 6. Cumulative collection efficiency for one block case (Case 1) and two blocks case (Case 2) with $u_0 = 2.0 \text{ m/s}$, $Es = 0.08$.

수에서 100%의 집진효율을 나타낸다. 이는 그림 4의 입자의 궤적에서 설명한 바와 같이 Case 1의 경우, Case 2에서처럼 비교적 큰 입경의 입자부착에 불리하게 작용하는 블록간격에 의한 영향이 없기 때문이다.

그림 7과 그림 8은 블록배열에 따른 Case 1과 Case

2에 대한 덕트 입구에서의 기체의 평균 유입속도, 정전수, 블록간격 및 입경에 따른 총 집진효율(total collection efficiency)을, 전기 집진기의 제작과 성능 평가 시 널리 이용되는 Deutsch 효율식에 의한 집진효율과 비교한 것이다. 그림 7과 그림 8을 통하여, 상류블록의 영향만 받는 경우(계산영역 내에 블록이 한 개 존재하는 경우, Case 1)와 상류블록과 하류블록의 영향을 함께 받는 경우(계산영역 내에 블록이 두 개 존재하는 경우, Case 2)가 입자의 이동 및 집진효율에 미치는 영향에 대한 정량적인 비교, 분석이 가능하다. 식(17)에 의해 계산된 Deutsch 효율식은, 그림 7과 그림 8에서 정전수의 변화에 대해 선형적으로 나타나며, 입경에 따른 변화는 없다.

그림 7은 유입속도가 0.5 m/s 인 경우에 대한 총 집진효율을 Deutsch 효율식과 비교한 그림이다. 그림에서 $b/w = 2$ 인 경우, 대부분의 입경에서 계산영역 내에 블록이 한 개 존재하는 Case 1인 경우에 비해 계산영역 내에 블록이 두 개 존재하는 Case 2인 경우가 정전수가 비교적 낮은 0.02와 0.04에서 총 집진효율이 높게 나타남을 알 수 있으며, 두 경우에 대한 집진효율의 차이는 입경이 커질수록 점차 감소하고 있다. 이는 그림 5에서 설명한 바와 같이, 정전수가 비교적 낮을 때, 입경이 비교적 작은 경우에는 재순환 영역으로의 유입이 쉽고 전기력의 영향에 쉽게 반응하기 때문에 Case 2가 입자의 부착에 유리하고, 입경이 커지게 되면 오직 관성력에만 의존한 부착만 이루어지게 되어 입경의 증가에 따른 블록간격의 변화도 볼 수 있는데, 그림에서 $b/w = 8$ 이 되면 정전수 0.02와 0.04에서 집진효율이 Case 1에 비해 오히려 낮아지는 입경이 나타난다. 그러나 관성력의 영향이 전기력의 영향보다 높아지는 입경, 즉 최소효율입경보다 입경이 큰 입자일수록 두 경우 사이의 집진효율의 차이가 점차 감소한다. 따라서 정전수가 비교적 낮은 경우, 최소효율입경에 근접한 입경일수록, 블록간격이 증가함에 따른 집진효율의 감소가 크며, 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우에 비해 집진효율이 낮아질 수 있으므로 계산영역 내에 블록이 두 개인 경우에는 블록간격을 최소한으로 줄이는 것이 집진효율을 높이는 방법이라고 할 수 있다.

두 경우의 집진효율을 Deutsch 효율식과 비교해 보면, 정전수 0.08인 경우는 언제나 Deutsch 효율식보다 높으며, 정전수가 비교적 낮은 0.02와 0.04의 경우는 Deutsch 효율식보다 집진효율이 낮아지는 입경이 나타난다. 그리고 최소효율입경보다 작은 입경영역에서 정전수 0.04인 경우가 정전수 0.02인

경우에 비해 Deutsch 효율식보다 집진효율이 높은 입경이 더 많이 존재하고, Case 2에서는 블록간격이 증가함에 따라 이러한 영역이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 최소효율입경보다 입경이 커짐에 따라 정전수 0.02인 경우에는 Deutsch 효율식보다 집진효율이 높은 입경이 존재하는 반면, 정전수 0.04인 경우에는 나타나지 않는다. 이는 블록의 높이와 관계가 있는데, 본 연구에서 사용된 블록의 높이는 덕트 폭의 1/2이다. 따라서 최소효율입경보다 입경이 커서 관성의 영향이 아무리 증가하더라도 집진효율은 50%를 넘지 못하게 된다(박성호와 박청연, 2000). 그러나 블록의 높이를 더 높게 함으로써 최소효율입경보다 입경이 큰 경우, Deutsch 효율식보다 집진효율을 더 높게 할 수 있다. 하지만 Deutsch 효율식은 정전수에 비례하기 때문에 정전수가 높아지면 다시 Deutsch 효율식보다 낮아지게 될 것이다. 따라서 입경이 비교적 작은 경우에는 정전수가 비교적 낮은 경우에도 Deutsch 효율식보다 집진효율을 높일 수 있고, 블록 높이를 조절함으로써 입경이 비교적 큰 경우에도 Deutsch 효율식보다 집진효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 입구 유입속도가 2.0 m/s인 경우이며, 그림 7에 비해 유입속도가 네 배나 증가하였다. 따라서 그림 7에서 설명한 바와 같이, 관성의 영향이 증가하여 두 경우에 대한 집진효율의 차이가 감소하였음을 쉽게 알 수 있다. 또한 그림 7의 경우와 마찬가지로 블록간격의 증가에 따른 집진효율의 변화도 볼 수 있는데, 최소효율입경에 근접한 입경의 경우 Case 2의 집진효율이 더욱 낮아졌다. 그러나 그림 8에서도 최소효율입경보다 입경이 크면 클수록 관성력의 영향이 증가하여 두 경우 사이의 집진효율의 차이가 점차감소함을 확인할 수 있다. 또한 그림 8에서 정전수가 0.08인 경우, 입경이 비교적 클 때 Case 2에서는 블록간격이 증가함에 따라 효율이 100%가 되지 못하는 입경이 나타난 반면, 입자 집진효율에 불리하게 작용하는 블록간격의 영향이 없는 Case 1인 경우에는 모든 입경에서 100%의 집진효율을 보인다.

두 경우의 집진효율을 Deutsch 효율식과 비교해 보면, 정전수 0.08에서 Deutsch 효율식보다 집진효율이 낮아지는 입경이 존재하게 되었고, 정전수 0.02와 0.04인 경우, 최소효율입경보다 작은 입경영역에서

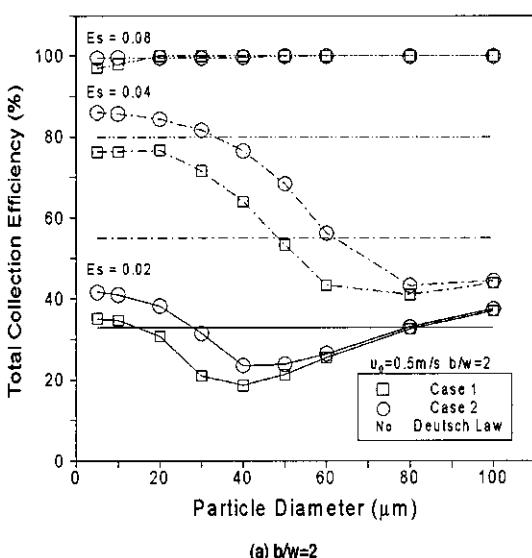
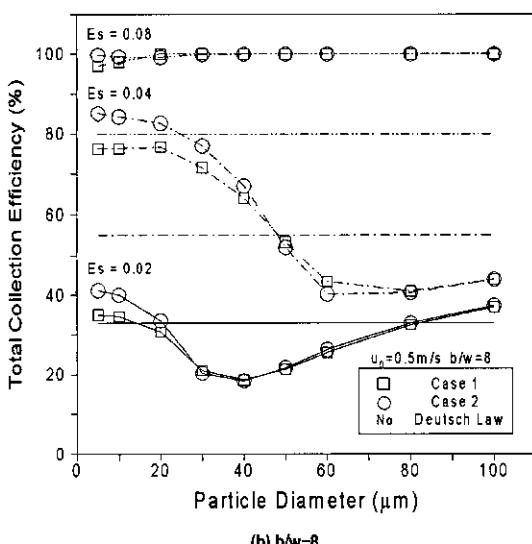
(a) $b/w=2$ (b) $b/w=8$

Fig. 7. Total collection efficiency for the block distance according to one block case (Case 1), two blocks case (Case 2) and Deutsch law with $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$.

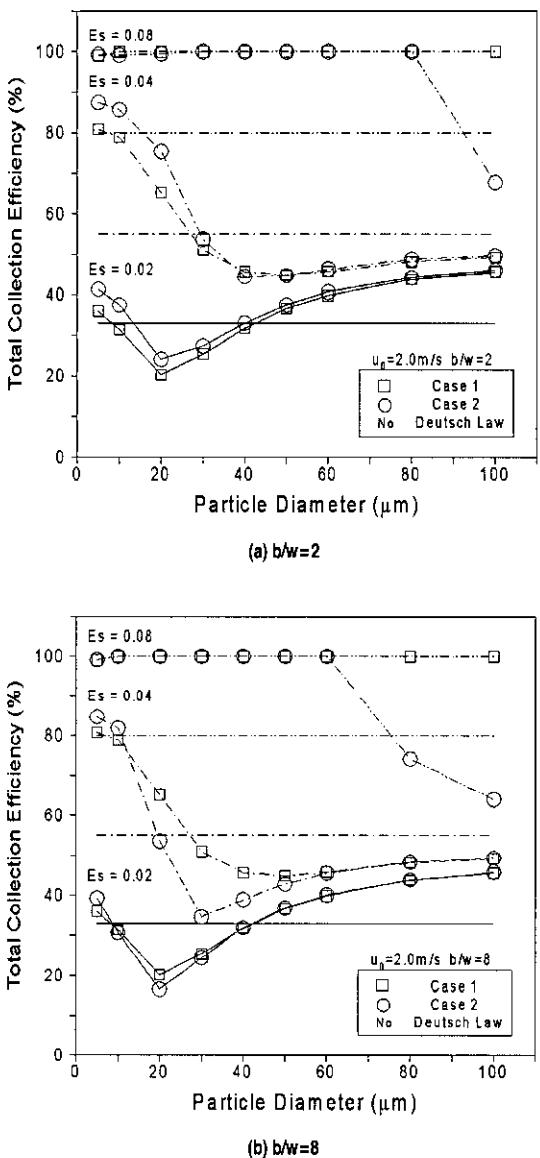


Fig. 8. Total collection efficiency for the block distance according to one block case (Case 1), two blocks case (Case 2) and Deutsch law with $u_0 = 2.0 \text{ m/s}$.

Deutsch 효율식보다 집진효율이 높은 입자의 영역이 그림 6에 비해 감소하였다. 그림 7에서처럼 Case 2에서 블록간격이 증가함에 따라 Deutsch 효율식보다 집진효율이 낮은 입자의 영역이 점점 더 증가하였고, 정전수 0.02인 경우에는 최소효율입경보다 입경이 커짐에 따라 Deutsch 효율식보다 효율이 높은

입자의 영역이 관성력에 의한 부착에 의해 그림 7과 비교하여 더 많아졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 2단식 전기집진기의 집진부의 해석을 위하여, 해석하고자 하는 집진부 영역을 지정하고, 집진부 입구에서의 기체의 평균유입속도(u_0), 정전수(E_s), 블록간격(b/w) 및 입경(d_p)을 변수로 사용하여 블록배열에 따른 입자의 이동 및 집진효율에 관한 정량적인 비교, 분석을 수치 해석적 연구를 통해 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재순환 영역으로 유입되는 입자와 터트 벽 부근을 지나는 입자는 비교적 낮은 정전수에서도 대부분 부착이 이루어진다. 따라서 입경이 작을수록 지정된 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우가 블록이 두 개인 경우에 비해 집진효율이 낮다. 그러나 입경이 커지거나 입구 유입속도의 증가로 관성력의 영향이 증가하면 지정된 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우와 두 개인 경우에 대한 집진효율의 차이는 감소한다.

2) 블록간격의 증가는 지정된 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우와 블록이 두 개인 경우에 대한 집진효율의 차이를 감소시키게 된다. 또한 지정된 계산영역 내에 블록이 두 개인 경우에는 지정된 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우에 비해 블록간격이 증가함에 따라 최소효율입경에 근접하는 입경의 경우 집진효율이 더 낮아질 수 있다.

3) 지정된 계산영역 내에 블록이 한 개인 경우와 블록이 두 개인 경우를 Deutsch 효율식과 비교해 보면, 입경이 비교적 작을수록 Deutsch 효율식보다 집진효율이 높고 블록이 존재함으로써 나타난 최소효율입경에서의 집진효율은 언제나 Deutsch 효율식보다 낮다.

참 고 문 현

박성호, 박청연(2000) 2단식 전기집진기의 집진판 블록간격 및 입자크기가 입자의 부착효율에 미치는 영향, 한국대기환경학회, 16(2), 165-177.

Chang, C.L. and H. Bai (1999) An experimental study on the

- performance of a single discharge wire-plate electrostatic precipitator with back corona, *J. Aerosol Sci.*, 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 of 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.
- Hinds, W.C. (1982) *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York.
- Kihm, K.D., M. Mitchner, and S.A. Self (1985) Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in laminar flow, *J. Electrostatics*, 17, 193–208.
- Kihm, K.D., M. Mitchner, and S.A. Self (1987) Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in turbulent flow, *J. Electrostatics*, 19, 21–32.
- Lauder, B.E. and D.B. Spalding (1974) The numerical computation of turbulent flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, 269–289.
- McLean, K.J. (1988) Electrostatic precipitators, *IEE Proc*, 135, 347–361.
- Oglesby, S.Jr. and G.B. Nichols (1978) *Electrostatic precipitation*, Marcel Dekker, New York and Basel.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- Patel, S.N., T.D. Rahmolow, R.A. Kjendal, and J.J. Meehan (1985) The effect of back corona in a laboratory scale electrostatic precipitator, *IEEE Trans, IA-21*, 935–938.
- 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 Sci.*, 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 Sci. Technol.*, 27, 308–323.