〈論 文〉

정전집진기내의 입자궤적 가시화

박석주* · 김상수**

(1993년 9월 3일 접수)

Particle Trajectory Visualization in Electrostatic Precipitator

Seok Joo Park and Sang Soo Kim

Key Words: Particle Trajectory(입자궤적), Corona Wind(코로나유동), Electrostatic Precipitator(정전집진기), Visualization(가시화)

Abstract

Particle trajectory visualization using laser sheet was performed to investigate the corona wind flow interactions in the one-wire and two-wire type electrostatic precipitators. The corona wind generated by corona discharge was not negligible, and strong flow interactions took place owing to the induced circulatory cells. In the case of one-wire type, as the applied voltage was increased and the cross-section mean velocity was decreased, the effect of corona wind became active. In the case of two-wire type, if upstream discharge voltage was relatively higher than downstream discharge voltage, the effect of upstream corona wind was reduced.

1. 서 론

급속한 산업발전과 더불어 산업 전반에 결쳐 환경오염 문제가 심각해짐에 따라 대기오염 방지장치의 연구개발이 날로 활발해지고 있다. 특히 석유와 석탄의 연소로 인하여 발생되는 분진(fly ash)과 미분탄들이 시계의 저하, 기후변동 그리고 호흡기장애 등의 주요인으로 밝혀지자 높은 효율의 집진장치들이 필요하게 되었다.

주요한 집진장치들로는 기계적 힘을 이용한 사이클론, 공기역학적 관성력을 이용한 습식스크루버(wet scrubber)와 필터, 그리고 전기적인 힘을 이용한 정전집진기(electrostatic precipitator) 등이 있으며 이 중에서 정전집진기는 다른 청정장치들에 비하여 적은 에너지로 구동이 가능하며 압력강하도 스크루버나 필터보다 훨씬 적기 때문에 상당한 유량을 처리할 수 있으며 작은 입자들(0.05~10 μm)의 상대적 집진효율이 높아 최근에는 산업 및 환경용 집진장치로 널리 사용되고 있으나 현재 이론적 정리가 부족한 상태이다. 이와 같은 필요성에 따라 정전집진기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 국내의 연구실적은 아주 미미한 실정이다.

정전집진기는 방전부와 집진부가 함께 있는 1단식(one stage)과 이를 별도로 두는 2단식(two stage)으로 나뉘고, 방전극의 극성에 따라 양코로나 방전방식과 음코로나 방전방식으로 나뉜다. 대개 2단식과 양코로나 방전방식이 공조용으로, 1단식과 음코로나 방전방식이 산업용으로 사용된다. 그리고 기하학적 형상에 따라 원통형(cylindrical type)과 평판형(plate type) 두가지로 나뉘며 처리유량이 많은 경우 후자가 사용되나 효율은 전자가 더 높다.

산업용 정전집진기는 평행하게 배열된 여러 장의 접지판들과 그 중앙선을 따라 일정 간격으로 설치되는 방전와이어들로 구성된다. 방전극에 고전압이 인가되면 이온이 발생되고 주위의 입자들은 방전극

*한국과학기술원 대학원 기계공학과
**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

과 같은 극으로 하전되어 접지극으로 이동하여 부착된다. 부착된 입자들은 추타(rapping)에 의하여 호퍼(hopper)로 떨어져 제거된다.

집진기내의 유체유동은 유입유동장(cross-section flow)에 의한 주유동(primary flow)과 코로나방전에 의한 코로나유동(corona wind, secondary flow, electric wind, ionic wind)으로 나뉜다. 양코로나 방전인 경우, 방전극 근처에서 생성된 양이온들이 접지극을 향하여 이동하는 동안 주위의 중성분자들에 운동량을 주어 코로나 유동을 발생시킨다. 이전의 연구들에서는 코로나 유동이 입자 거동에 미치는 영향에 관하여 명확하게 거론되지 않았다.

본 연구에서는 정전집진기의 성능 해석시 코로나 유동이 입자의 운동에 미치는 영향을 입자궤적 가시화를 통하여 정성적으로 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경[1]

방전극에 고전압이 인가되면 와이어 근처에는 전기장세기가 상당히 크므로 이곳을 지나는 전자들(20 electrons/cm^3-s)은 높은 전기이동률(electrical mobility)때문에 고속으로 가속되어 주위의 기체분자와 충돌하여 기체분자의 외곽전자를 방출하게 하고 양이온과 자유전자를 생성하게 한다. 생성된 전자들은 같은 과정을 반복하여 코로나방전 영역내에 상당량의 전자와 양이온들을 생성시키는 전자폭발(electron avalanche) 현상이 일어난다. 만약 방전극이 음이면 전자는 접지극으로, 양이온은 방전극으로 이동하고, 양이면 반대가 된다. 본 실험에선 음코로나 방전보다 유동장이 더 안정된 양코로나 방전인 경우를 실험하였다.[2]

전기장세기가 약한 코로나영역(corona sheath) 바깥에서는 전자들이 분자들을 이온화시킬 만큼 충분한 에너지를 가지지 못하므로 양코로나 방전인 경우는 양이온이, 음코로나 방전인 경우는 자유전자가 주위의 분자들과 충돌하여 하전이 이루어진다.

방전영역 바깥을 지나는 입자들은 이온들의 불규칙한 열운동이나 입자 주위에 형성된 전기장력선을 따라 이동하여 충돌하면서 하전된다. 전자의 경우를 확산하전(diffusion charging)이라고 하며 0.1 μm 이하의 입자에 대해 지배적이고, 후자는 전기장하전(field charging)이라고 하며 1 μm 이상의 입자에 지배적이다.

2.2 실험장치

집진부를 지나는 공기의 흐름을 균일하게 하고 난류강도를 낮추기 위하여 Morel[3]이 제시한 2차원 풍동 축소모델에 근거하여 Fig. 1과 같이 풍동을 제작하였다. 축소비는 6 : 1 로 하였고 2차원적으로 해석하기 위하여 벽면효과를 무시할 수 있도록 높이와 폭의 비도 6 : 1로 충분히 주었다. 또한 가시화실험을 위하여 출구 위와 집진부 위를 유리로 만들었으며, 부착된 입자들을 제거할 수 있도록 탈착이 가능하게 하였다.

집진부는 Fig. 2와 같이 풍동 양벽면에 동판(길이 150 mm, 높이 300 mm)을 부착하여 접지시키고 방전극이 한개인 경우는 중앙에, 방전극이 두개인 경우는 집진부 입구에서 4, 11 cm인 위치에 니크롬선(직경 0.2 mm, 길이 30 cm)을 팽팽하게 고정시킨 후 고전압공급장치(high-voltage power supply ; 한국스위칭)와 연결하였다. 판의 한 면은 전류밀도(current density)를 측정하기 위하여 유동방향으로 11개의 구리봉을 집진판과 절연 상태를 유지하면서 일정 간격으로 설치하였다. 미세 전류를 측정하기 위하여 저항(1 MΩ)과 전압계를 이용하여 회로를 구성하였으며, 이를 부위별로 측정할 수 있도록 로타리스위치를 연결하였다. 또한 총 전류량을 측정하기 위해 마이크로전류계(microam meter)를 집진판과 연결한 후 접지시켰다.

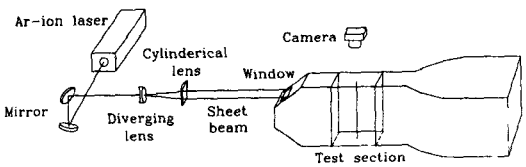


Fig. 1 Laser sheet optical configuration and wind tunnel

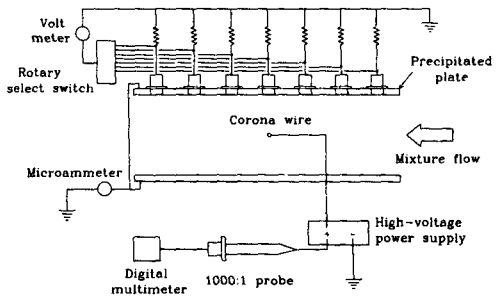


Fig. 2 Schematic diagram for current density and total current

부유입자는 유동층 입자발생기에 이산화규소 분말(SiO_2, 1~15 μm)을 공급하였다. 입자크기의 분포는 직접 부착시킨 후 SEM(scanning electron microscopy)을 이용하여 측정하였다.

입자궤적 가시화를 위하여 광원(argon ion laser, 514.5 nm, 1.7 W ; COHERENT, INNOVA 70 SERIES)에서 나온 빛을 Fig. 1과 같이 발산렌즈(diverging lens)를 통하여 평면광을 만든 후 적당한 촛점의 원통렌즈(cylindrical lens)의 위치를 조정하여 원하는 폭의 평면광이 실험부를 지나게 하고 유동방향에 수직하게 카메라를 설치하여 촬영을 하였다

2.3 실험방법 및 내용

실험조건은 실험장치의 한계로 인하여 유입유속을 0~1 m/s, 평균 전기장세기를 0~14 kV/25 mm로 하였다.

부유입자가 없는 상태에서 인가전압에 따른 총 전류의 변화, 그리고 총 전류와 평균유속의 관계를 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 접지극과 접지 사이에 마이크로전류계를 연결하여 방전극에 인가되는 전압과 공기의 평균속도에 따른 총 전류를 측정하였다. 실제 집진기의 유입유속은 1~2 m/s이며, 본 실험에서는 팬용량의 한계때문에 0과 1 m/s인 경우만을 비교하였다.

각각의 평균유속과 인가전압을 조합하여 나타나는 유동장을 관찰하기 위하여 적당한 노출시간(1/30 sec)과 조리개를 조절(F1.4)하여 수직 방향에서 사진기로 촬영하였다. 촬영시 광학장치부에서 산란되는 빛을 암막으로 차단하여 주위를 어둡게 하고, 창에 부착된 입자들을 매번 제거하여 선명한 사진을 얻을 수 있도록 하였다.

2.4 실험결과 및 고찰

2.4.1 총 전류와 전류밀도분포

유입입자가 없는 상태에서 총 전류량과 전류밀도를 공기의 주유동이 없는 경우와 1 m/s인 경우에 대해 측정한 결과, 본 실험조건에서 Fig. 3, Fig. 4(a)와 같이 평균유속에 따른 총전류량과 전류밀도의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 작은 속도(9.1 m/s 이하)의 기체유동이 이온의 유동에 거의 영향을 주지 않는 것으로 볼 수 있다. Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)를 정규화한 것으로 Yamamoto와

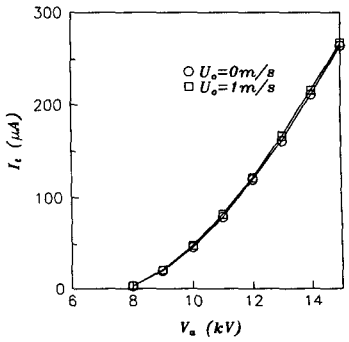


Fig. 3 Measured total current-voltage characteristics

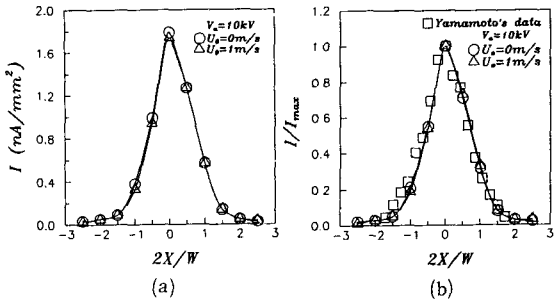


Fig. 4 Current density and normalized current density at the precipitation plate for different mean velocities

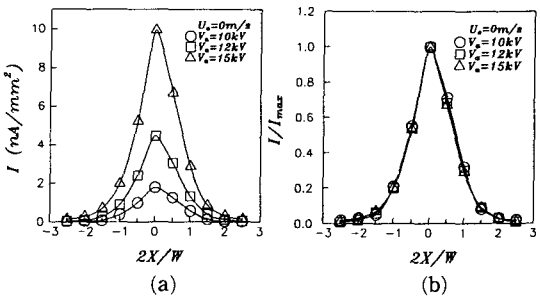


Fig. 5 Current density and normalized current density at the precipitation plate for different applied voltages

Velkoff[4]의 실험 결과와 잘 일치한다.

Fig. 5(a)는 인가전압이 클수록 전류밀도가 크게 나타남을 보여주며 Fig. 5(b)는 인가전압이 정규화된 전류밀도의 분포에 영향을 주지 않음을 나타낸다.

2.4.2 유동장 가시화

Fig. 6과 같은 2차원 와이어-평판의 기하형상에

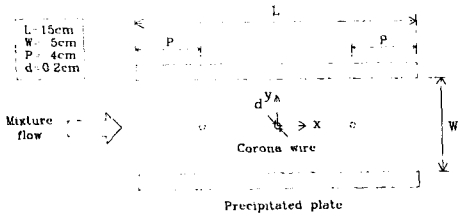


Fig. 6 Model precipitator geometry

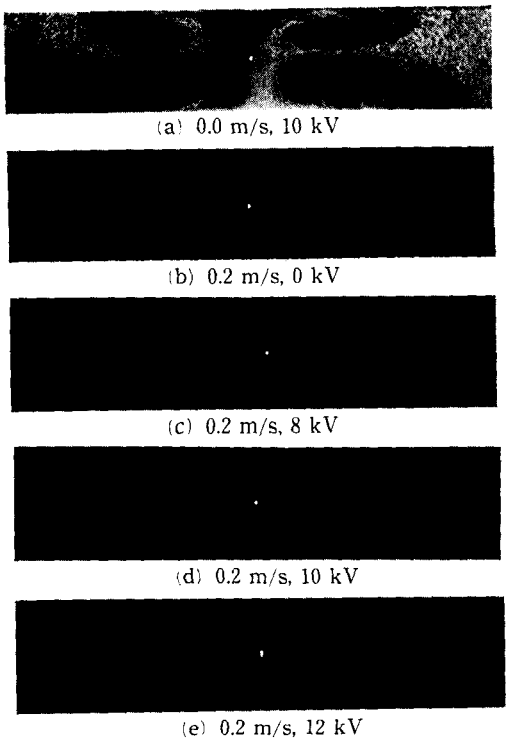


Fig. 7 Particle trajectories visualization for one-wire configuration

서 유동이 왼쪽에서 오른쪽으로 흐를 때 실험결과는 다음과 같다.

(1) 방전극이 한개인 경우

Fig. 7과 Fig. 8은 방전극이 한개인 경우 주유동속도(0, 0.2, 0.5 m/s)와 인가전압(0, 8, 10, 12, 14 kV)의 변화에 따른 입자의 궤적을 보여준다.

Fig. 7(a)는 공기의 유속이 없이 입자들이 정체된 경우 순간적으로 10 kV가 인가되었을 때 하전입자들에 작용하는 쿨롱힘과 코로나유동의 운동량에 의해 방전극에서 집진극으로 향하는 두 쌍의 순환셀(recirculatory cell)들이 생성되었다. 그림에서 좌측상단의 와류는 반시계방향으로, 우측상단의

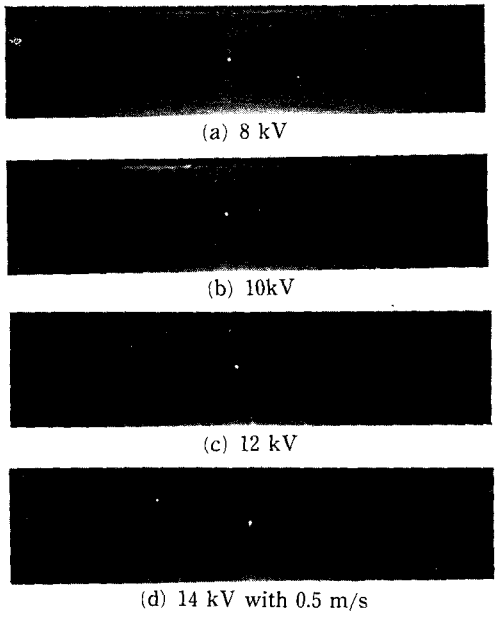


Fig. 8 Particle trajectories visualization for one-wire configuration

와류는 시계방향으로 회전하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)는 공기의 평균유속이 0.2 m/s이고 전압이 인가되지 않았을 때 유동장이 균일하게 나타남을 보여 준다. Fig. 7(c)~(e)는 공기의 평균유속이 0.2 m/s일 때 인가전압이 8, 10, 12 kV의 단계로 전압이 증가함에 따라 입자와 이온들에 작용하는 쿨롱힘과 코로나유동의 운동량이 증가하여 좌측의 와류는 점점 성장하지만 우측의 와류는 나타나지 않고 대신 빈공간(void)의 폭이 커지면서 불규칙한 요동(disturbance)이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 7(d), (e)를 관찰해 보면 유입입자들이 곧바로 접지극을 향하지 않고 채널의 중앙선방향으로 휘어지고 방전극 근처를 지난 후 다시 접지극방향으로 향하면서 입자들이 벽면에 부착된다. 즉, 실험부 입구에서 집진판 근처를 지나는 입자들이 코로나유동에 의하여 집진판에서 멀어지는 경향이 있으므로, 입구에서 유입되는 입자수에 대한 집진판에 부착되는 입자수의 비인 집진효율의 해석시 코로나유동의 효과를 고려하지 않을 경우 계산되는 집진효율은 코로나유동의 효과를 고려한 경우에 비하여 상대적으로 더 높게 평가될 것으로 사료된다.

Fig. 8은 공기의 평균유속이 0.5 m/s이고 인가전압이 8, 10, 12, 14 kV인 경우로서 Fig. 7(c)~(e)와 비교해 볼 때 공기의 평균유속이 증가함에 따라

와류의 크기와 빈공간의 폭이 작아지면서 유동이 안정해지는 데 이는 쿨롱힘과 코로나유동의 강도에 비해 주유동방향으로의 입자 관성력이 더 크기 때문임을 알 수 있다.

공기의 평균유속을 1 m/s로 증가시키면 입자의 관성력이 더 증가하게 되므로 인가전압이 14 kV까지 증가하여도 순환셀이 나타나지 않았으며 빈공간의 폭 또한 줄어들었다.

(2) 방전극이 두개인 경우

Fig. 9와 Fig. 10은 방전극이 두개인 경우 주유동속도(0, 0.2 m/s)와 상류방전극 인가전압(8, 9 kV), 하류방전극 인가전압(0, 6, 8, 10, 14 kV)의 변화에 따른 입자궤적 가시화의 결과이다.

Fig. 9(a)는 입자들이 정체된 상태에 두개의 방전극에 10 kV를 동시에 인가하였을 때 쿨롱힘과 코로나유동으로 인한 두 쌍의 순환셀이 발생하며, 이는 Yamamoto의 계산 결과를 잘 검증해 준다.

Fig. 9(b)~(e)는 상류 방전극의 인가전압을 8 kV로 고정시키고, 하류 방전극에 0, 6, 8, 10 kV를 단계적으로 인가한 경우 입자궤적을 나타낸다. 여기서 특이한 점은 하류 방전극의 인가전압이 증가함에 따라 상류 방전극의 코로나유동에 의한 빈공간 폭이 줄어들면서 사라지는 경향을 볼 수 있는데, 그 원인은 Yamamoto의 계산결과로 미루어 볼 때 상류 방전극 선상을 지난 유선들이 하류 방전극의 코로나유동에 의하여 채널의 중앙선 방향으로 밀집되기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 9(b)는 Fig. 7(c)와 달리 하류 방전극이 0 V이므로 하전입자들이 하류 방전극 방향으로 힘이 작용하게 되어 빈공간의 폭이 줄어들게 된다.

Fig. 10은 상류 방전극에 9 kV의 전압을 인가시킨 후 하류 방전극에 0, 8, 10, 14 kV를 단계별로 인가한 결과로써, 상류 방전극의 인가전압이 높기 때문에 Fig. 9(b)~(e)와 같이 뚜렷한 변화는 볼 수 없지만 마찬가지로 하류 방전극의 인가전압이 증가함에 따라 하류 방전극 좌측의 와류로 인하여 빈공간의 폭이 줄어드는 경향을 볼 수 있으며, 상류 방전극의 인가전압이 10 kV 이상인 경우는 상류 방전극 근처의 집진판에서 대부분이 부착되므로 이와 같은 경향을 볼 수 없다.

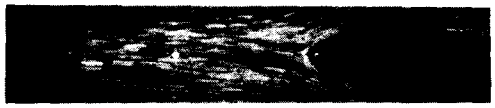
주유동속도가 0.5 m/s인 경우에도 0.2 m/s인 경우와 같은 경향을 볼 수 있으며, 상류 방전극의 인가전압이 10 kV일 때도 같은 경향이 나타난다.

이상과 같이 방전극이 두개인 경우 상류 방전극에 특정전압 이하가 인가되고, 하류 방전극에 상대적으로 높은 전압이 인가되면 상류 방전극의 코로나유동 효과가 줄어들어 상류 방전극의 코로나방전

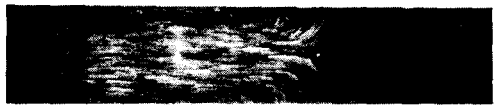
(a) 0.0 m/s, 10 kV : 10 kV

(b) 0.2 m/s, 8 kV : 0 kV

(c) 0.2 m/s, 8 kV : 6 kV



(d) 0.2 m/s, 8 kV : 8 kV



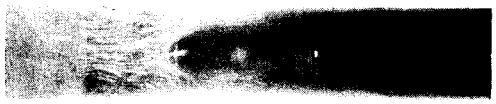
(e) 0.2 m/s, 8 kV : 10 kV

Fig. 9 Particle trajectories visualization for two-wire configuration

(a) 9 kV : 0 kV

(b) 9 kV : 8kV

(c) 9 kV : 10 kV



(d) 9 kV : 14 kV with 0.2 m/s

Fig. 10 Particle trajectories visualization for two-wire configuration.

으로 인한 부착효과는 적을 것이고 단순히 입자의 하전에만 영향을 줄 것이므로 충분히 하전된 이 입자들이 하류 방전극의 인가전압에 의하여 집진이 이루어지게 된다.

3. 결 론

(1) 주유동속도가 작고 인가전압이 높을수록 입자에 작용하는 쿨롱힘과 코로나유동의 운동량이 증가하므로 입자의 부착 부위는 상류방향으로 이동하게 되어 집진효율이 증가하게 된다.

(2) 코로나유동은 집진판 근처로 유입되는 입자들을 집진판에서 멀어지게 하는 효과가 있으므로 집진효율의 해석시 코로나유동의 효과를 고려하지 않을 경우 계산되는 집진효율은 코로나유동의 효과를 고려한 경우에 비하여 상대적으로 더 높게 평가될 것이다. 그러므로 수치적 방법을 통한 집진효율의 해석시 코로나유동의 효과는 고려되어야 한다.

(3) 방전극이 두개인 경우 하류 방전극의 인가전압이 상류 방전극의 인가전압에 비하여 상대적으로 높을수록 상류 방전극의 코로나유동 효과가 감쇠된다.

참고문헌

(1) Ogawa, A., 1984, *Separation of Particles from Air and Gases*, CRC Press, Inc Vol. 2.

(2) Kallio, G. A. and Stock, D. E., 1990, "Flow Visualization inside a Wire-Plate E.P.," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, No. 3, pp. 503~514.

(3) Morel, T., 1981, "Design of 2-Dimensional Wind Tunnel Contractions," *J. Fluid Mech.*, pp. 371~378.

(4) Yamamoto, T. and Velkoff, H. R., 1981, "EHD in an Electrostatic Precipitator," *J. Fliud Mech.*, Vol. 108, pp. 1~18.

(5) Yabe, A., Mori, Y. and Hijikata, K., 1978, "EHD Study of the Corona Wind between Wire and Plate Electrodes," *AIAA. J.*, Vol. 16, pp. 340~345.

(6) Leonard, G. L., Mitchner, M. and Self, S. A., 1983, "An Experimental Study of the Electrohydrodynamic Flow in Electrostatic Precipitators," *J. Fluid Mech.*, Vol. 127, pp. 123~140.

(7) Borgwardt, V., Petroll, J. and Scholtz, J., 1989, "The Effect of Particle Size on the Efficiency of Separation by an Eletrostatic Precipitator," *Int. Chem. Eng.*, Vol. 29, No. 2, pp. 212~220.