

활성탄전극을 이용한 분진제거에서 전극의 적정 간격에 관한 연구 Optimal Distance between Positive and Negative Electrode-Plates Coated with Activated Carbon in Dust Removal Chamber

김광수[†] · 박현철* · 전태환* · 이주행* · 남상철
Kwang Soo Kim[†] · Hyun Chul Park* · Tae Hwan Jun* · Ju Haeng Lee* · Sang Chul Nam

한국건설기술연구원 환경연구실 · *과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과
Department of Environment Research, Korea Institute of Construction Technology

*Department of Construction Environment Engineering, University of Science and Technology

(2013년 10월 11일 접수, 2013년 11월 6일 채택)

Abstract : The purposes of this research are to study on optimal distance between positive and negative electrodes in dust removal chamber. The experiments were performed with electrode-plate gab arranging in order of 3 cm, 2 cm, 1 cm in series while varying influent flow-rate. From the experimental results of dust removal the optimal influent linear velocity was 6 cm/sec and the total mass of attached dust on the surface of electrode-plate was increased as electrode-plate gab is closer. But in case of electrode-plate gab being very close about 1 cm or so, the attached dust on the surface of electrode-plate was shown releasing from electrode-plate due to dust electric-charge changing (reverse ionization). Eventually, optimal distance between positive and negative electrode-plates was about 2 cm and also optimal dust loading rate was about 24 mg/min·m².

Key Words : Electrodes, Activated Carbon, Linear Velocity, Dust Loading Rate

요약 : 본 연구의 목적은 분진제거 장치에서 전극간의 적정간격을 알아보기 위한 것이다. 실험은 전극간격을 3 cm, 2 cm, 1 cm로 직렬로 놓고 유입유량을 변화시켜 수행하였다. 실험결과로부터 분진제거를 위한 적정 선속도는 6 cm/sec였고 전극표면에 부착되는 분진 총량은 전극의 간격이 가까울수록 증가하였다. 그러나 1 cm 정도로 매우 가까울 경우는 전극판에 부착된 분진은 탈착되었으며 이는 부착된 분진의 역이온화 즉 전하의 변화 때문인 것으로 사료되었다. 결과적으로 전극판에서 양전극과 음전극 간의 간격은 2 cm가 적당하고 이때의 분진부하율은 24 mg/min·m²였다.

주제어 : 전극, 활성탄, 선속도, 분진부하율

1. 서론

도로에서 발생하는 공해로는 소음, 분진, 휘발성 물질 세 가지로 구분할 수 있으며, 이중 장대터널에서 발생하는 물질중 가장 큰 오염물질은 매연 등에 의한 분진물질이다.¹⁾ 종래의 분진물질 제거방법으로는 중력식 침전, 습식세정(wet scrubber), 섬유여과(bag filter) 그리고 전기집진(electrostatic precipitator) 등이 있다.²⁾ 각각의 방법은 대부분 공장 등 산업단지에서 발생하는 대규모 처리에 적합한 방법이고 분진의 농도가 낮으며 설치할 공간이 여의치 않은 터널 등에서는 적절치 못하다. 하지만 전기집진장치는 1 μm 이하의 입자도 높은 제거효율로 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 에너지 소모와 압력손실이 적으며 비교적 높은 온도의 가스도 취급할 수 있다는 장점이 있다.³⁾ 그러나 전기집진장치에서는 코로나(corona) 방전 시 고압의 직류전류가 요구되어 많은 전기가 소요되는 문제점이 있고, 전기집진장치의 전극판은 통상 스테인레스 스틸 또는 철판 등을 이용하는데, 통상의 철판은 분진이 부착되는 비표면적이 낮고 전류밀도가 전극판의 엣지(edge)에만 집중되어, 전극판 표면에 고르게 부착되지 않는 문제점이 있다.³⁾ 이에 전극판의 비표면적을 증가

시켜 분진의 부착면적을 증대시키고, 또한 전류밀도를 전극판에 고르게 분포시켜서,⁴⁾ 분진의 부착이 한곳에 편중되지 않고 균일하게 부착할 수 있는 방안이 필요하였다. 최근 이의 해결책으로 다공성 활성탄의 기공은 그대로 유지하고 전극판에 얇은 필름형태로 코팅시킬 수 방법을 개발하여 연구결과로서 발표한 바 있다.⁵⁾

본 연구에서는 알루미늄판에 활성탄을 박판으로 코팅한 활성탄 전극을 제조하여 여러 간격 별로 배치하고 유입 선속도에 따른 분진제거효율 및 부착량을 산정하여 이를 기초로 정전기를 이용한 분진제거에서 가장 중요한 요소인 전극의 적정 간격에 대하여 알아보았다.

2. 연구방법

2.1. 활성탄 전극

활성탄 전극 제조 시 가장 중요한 점은 전극에 활성탄을 부착시키기 위해서는 바인더(binder)가 필요하며, 바인더제 주입 시 활성탄 세공이 막히는 문제점이 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 분말활성탄 세공에 접착제의 용매제인 메탄

[†] Corresponding author E-mail: kskim@kict.re.kr Tel: 031-910-0299 Fax: 031-910-0291

을 충진시키고 비닐계 접착제인 PVA (poly vinyl acetate)와 혼합 후 세공에 메탄올을 휘발시키기 위하여 메탄올 휘발점보다 훨씬 높은 약 100°C에서 약 1시간 건조시켰다. 건조과정에서 활성탄 세공은 그대로 살아 있고, 접착제는 굳어짐을 이용하는 방법으로 제작하였다. 활성탄과 PVA와의 배합무게비는 1 : 0.2-0.3이 적당하였고 블랙카본(black carbon)은 전기전도도를 향상시키기 위하여 주입하였다.⁵⁾

2.2. 실험장치 및 내용

2.2.1. 실험장치

실험장치는 분진발생장치, 먼지홀더, 유입유량계, 분진제거 활성탄 전극조, 그리고 처리공기 유출부로 구성되어 있다.

분진발생장치는 일본 Kanomax사의 Model 3211 Fluidized Bed Dust Generator를 사용하였다. 실험에 사용한 분진(Association powder process industry. Eng., Japan)의 주성분은 실리카이고, 크기는 1-8 μm 였다. 분진 발생원리는 컨베이어에 의해 이송된 분진은 콤프레셔의 유압에 의해 유동되는 모래층(sand bed)로 유입되어, 분진이 발생되며 발생한 분진은 홀더로 유입된 후, 홀더에서는 추가로 송풍기(blower)에 의해 발생하는 주입공기량을 이용하여 농도를 조절하였다. 분진제거 활성탄 전극조는 분진 유입부와 분진제거 전극조로 구성하였다. 분진 유입부는 유입된 공기가 45°로 확산되도록 콘(cone)형태로 제작하였고, 전극조는 10개의 모

듈(W 15 cm × H 15 cm × L 10 cm)로 구성하고, 각각의 모듈은 2개의 셀(cell, W 14.5 cm × H 14.5 cm × L 4.5 cm)이 안착될 수 있도록 하였으며, 각 셀에는 0.5 cm 간격으로 전극판(알루미늄 판 두께 1 mm, H 14.5 cm × L 4.5 cm)이 설치될 수 있도록 하였다. 그리고 유출부는 유입부와 마찬가지로 큰 형태로 제작하였다.

Fig. 1은 실험장치 전체모형, 모듈, 셀 그리고 전극의 크기에 대하여 나타낸 것이다.

2.2.2. 실험방법

전극판에 분진부착은 정전기에 의해 부착되기 때문에 정전기에 의한 부착속도가 유입되는 공기유속보다 커야한다.

본 실험에서는 유입전압은 5 kv로 고정시키고 유입공기량을 180 L/min, 120 L/min, 80 L/min으로 점차 낮추어 각각의 유입선속도는 13 cm/sec, 9 cm/sec, 6 cm/sec로 변화시켜 수행하였다. 그리고 전극의 설치는 한 모듈 당 2개의 셀로 구성하여, 총 3개의 모듈로 총 6개의 셀을 설치하였다. 각각의 모듈에서 전극의 배열의 순서는 유입부 2개의 셀은 양극과 음극을 3 cm 간격으로, 반응조 중간 2개의 셀은 2 cm 간격으로, 마지막 셀 2개는 1 cm 간격으로 설치하여 후단으로 갈수록 설치 전극수가 많은 직열식 점증형으로 하였다.

각각의 선속도에서 분진 총 제거효율, 전극간격 별 분진 제거효율 및 분진부착량을 알아보았다.

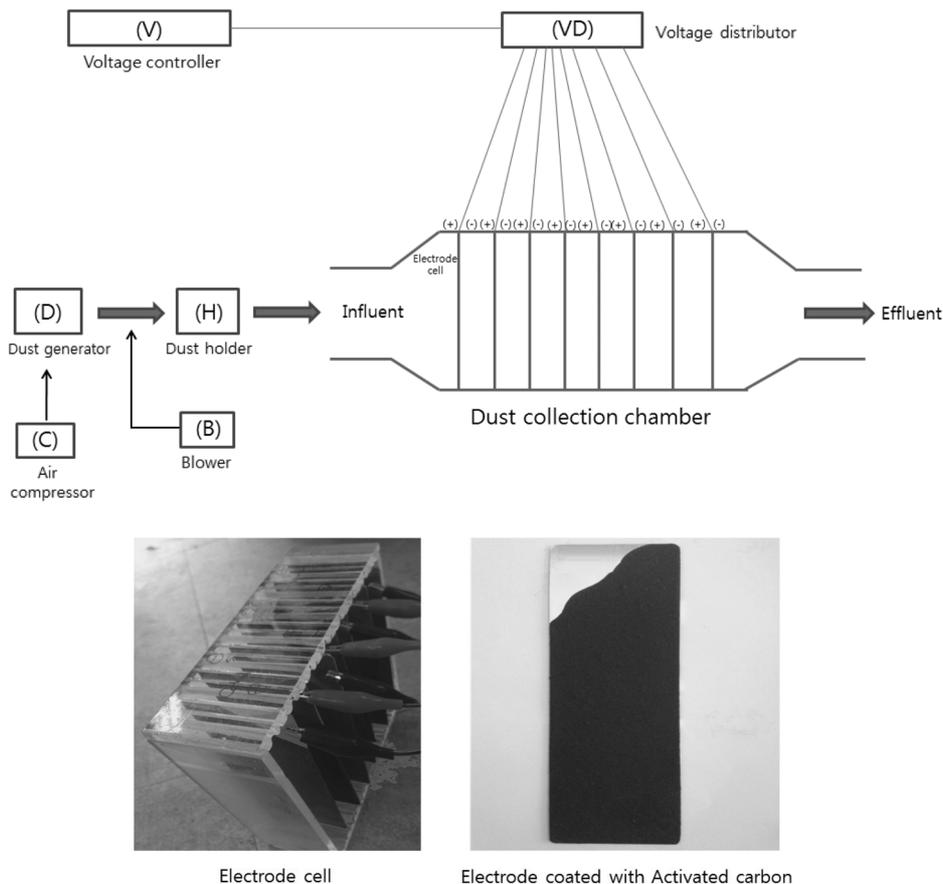


Fig. 1. Schematic diagram of dust removal chamber installed with activated carbon electrode-plate.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분진 총 제거효율

Fig. 2-4는 유입공기량을 180 L/min, 120 L/min, 80 L/min으로 유지하고 각각에 대하여 수행한 유입 및 유출 분진농도 그리고 제거효율을 나타낸 것이다. Fig. 2는 유입공기량이 180 L/min이고 선속도 13 cm/sec로 수행한 실험결과를 나타낸 것이다. 유입분진 농도는 6-7 mg/m³으로 비교적 일정하게 유입되고, 유출농도 또한 2.1-3.2 mg/m³로 비교적 안정적으로 유출되었으나, 총 제거효율은 약 55%로 비교적 낮은 제거효율을 나타내었다. Fig. 3은 유입공기량을 120 L/min으로 낮추고 선속도 9 cm/sec로 하여 수행한 결과이다. 유입공기량이 감소함에 따라 초기에는 공기공급튜브에 분진이 쌓여서 유입분진농도는 약 4 mg/m³로 낮았으나, 어느 정도 퇴적 후에는 12-13 mg/m³로 안정되게 유입됨을 알 수 있다. 유출분진의 농도는 초기의 낮은 농도 유입 시 유출분진의 농도는 약 0.8 mg/m³로 약 90%의 제거효율을 보이다가 유입분진의 농도가 높아지면서, 유출분진의 농도는 4 mg/m³로 서서히 증가하여, 제거효율은 점차적으로 70%로 감소하였다. 이는 본 연구의 분진제거장치는 plug flow 타입의 직렬식 제거장치로 장치의 앞단부터 먼지가 부착 제거된 후 점차적으로 후단에서 제거된다는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 유

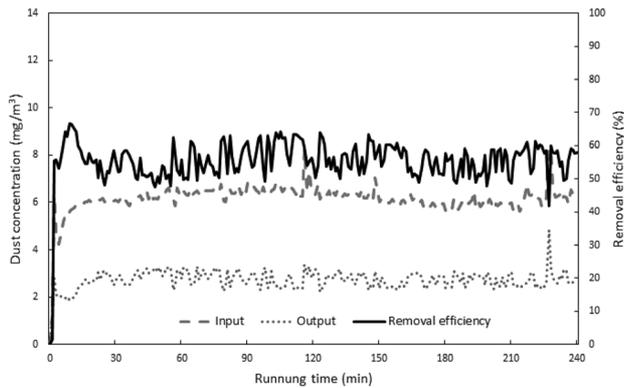


Fig. 2. Observation of influent and effluent dust concentration under the condition of 180 LPM of influent flow.

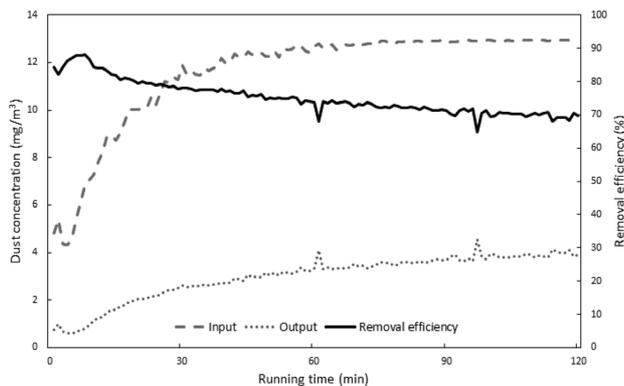


Fig. 3. Observation of influent and effluent dust concentration under the condition of 120 LPM of influent flow.

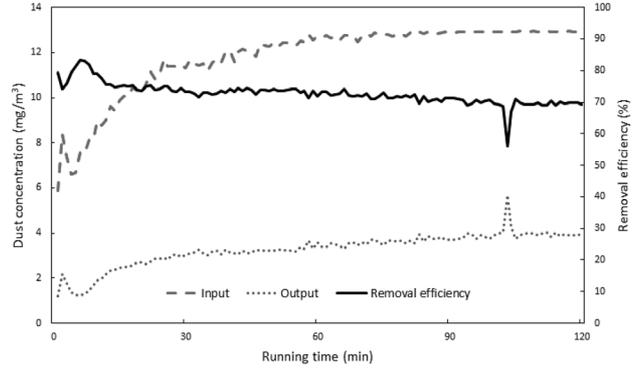


Fig. 4. Observation of influent and effluent dust concentration under the condition of 80 LPM of influent flow.

입공기량은 80 L/min, 선속도 6 cm/sec로 더욱 낮추어 수행한 결과로 유입공기량을 120 L/min에서와 마찬가지로 초기에 공기공급 튜브에 분진이 퇴적되어 유입농도가 낮다가 점차적으로 약 13 mg/m³로 증가하는 추세를 보였으며, 제거효율에서도 유입농도가 6-8 mg/m³로 낮을 경우는 85%의 제거효율을 보이다가 점차적으로 70%까지 낮아지는 경향을 보여 주었다.

결과적으로 시스템전체의 분진 제거효율을 높이기 위해서는 유입분진의 농도가 낮아야할 뿐만 아니라, 유입유량의 선속도는 정전기력에 의한 부착속도보다 낮은 6 cm/sec 이하가 적당함을 알 수 있었다.

3.2. 전극 간격 별 분진제거

Fig. 5-7은 유입공기량 및 선속도 별 전극이 설치된 각 모듈 및 셀에서 분진제거 농도 및 제거효율을 나타낸 것이다. 각각의 그림에서 part A는 전극 간격이 3 cm로 설치된 두 번째 셀 후단의 농도를 나타낸 것이고, part B 및 B'는 전극간격 2 cm의 전단 셀의 후부 및 후단 셀의 후부, 그리고 part C 및 C'는 각각 전극간격 1 cm 셀 전단의 후부 및 후단 셀의 후부의 농도를 측정된 것이다.

유입공기량을 180 L/min로 운전한 Fig. 5의 경우 전극간격 3 cm 및 2 cm 전단부를 거친 농도는 제거효율이 약 18%로 매우 낮았으나, 2 cm 후단 셀 및 1 cm 전단 셀에서는 제거효율이 가장 높은 70%까지 이르렀다. 그러나 후단 1 cm 셀에서는 반대로 부착된 먼지가 탈착되어 제거효율이 낮아짐을 보여 주고 있다. 유입공기량을 180 L/min로 운전한 본 실험에서는 시스템 전체의 제거효율을 알아보기 위하여 250분 간 운전 후 추가로 각 셀 별 분진제거효율을 알아보기 위한 실험을 180분 간을 추가로 운전하여, 각 전극에는 최대의 분진이 부착하였을 것으로 판단되었다. 그리고 특히, 마지막 과정인 전극 간격 1 cm에서는 각 단에서 미부착된 먼지가 정전량이 가장 높은 마지막 단에서 최대로 부착이 이루어졌을 것으로 사료되었다. 이와 같이 전극 간격이 가깝고 분진 부착량이 높을 경우 장시간 분진이 부착되어 있으면, 양극에 부착된 음이온의 먼지는 표면전하가 양전하로 바뀌고, 반대로 음극에 부착된 양이온의 먼지는 표면전하가 음전하

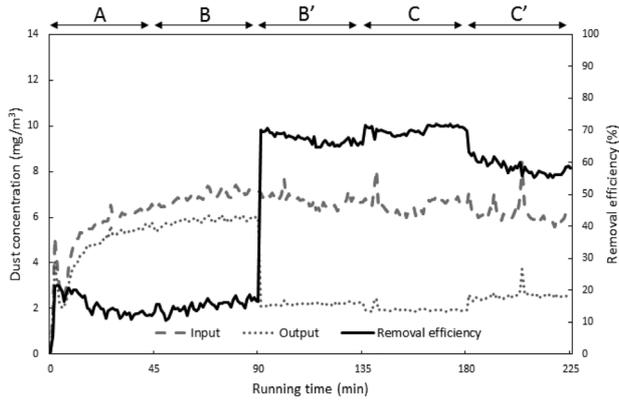


Fig. 5. Dust removal efficiency and effluent concentration at different distances from the mouth of dust inlet under the condition of 180 LPM of influent flow (A : 3 cm gab electrodes (20 cm far from inlet), B : 3 cm gab electrodes (30 cm far from inlet), B' : 3 cm gab electrodes (40 cm far from inlet), C : 1 cm gab electrodes (50 cm far from inlet), C' : 1 cm gab electrodes (60 cm far from inlet).

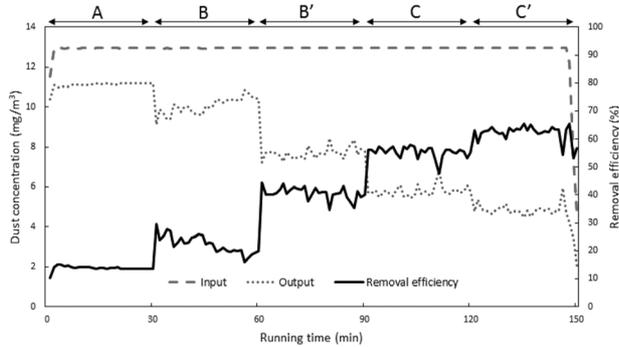


Fig. 6. Dust removal efficiency and effluent concentration at different distances from the mouth of dust inlet under the condition of 120 LPM of influent flow.

로 바뀌어, 전극에서는 분진의 교환이 발생되어 부착량이 저하되었기 때문에 탈착현상이 일어났다고 사료되었다.⁶⁾

유입 공기량을 120 L/min로 운전한 Fig. 6의 경우 전극간격 3 cm에서는 제거효율은 약 15%, 2 cm에서 전단에서는 약 22% 그리고 후단에서는 42%로 점진적으로 제거되고, 1 cm에서 유입공기량을 180 L/min와는 다르게 전단에서는 55%, 후단에서는 약 65%로 더욱 더 증가하는 추세를 보였다. 하지만 유출농도의 변화폭이 매우 크고 최종 측정 자료에서는 처리효율이 매우 낮아짐을 보여주고 있다.

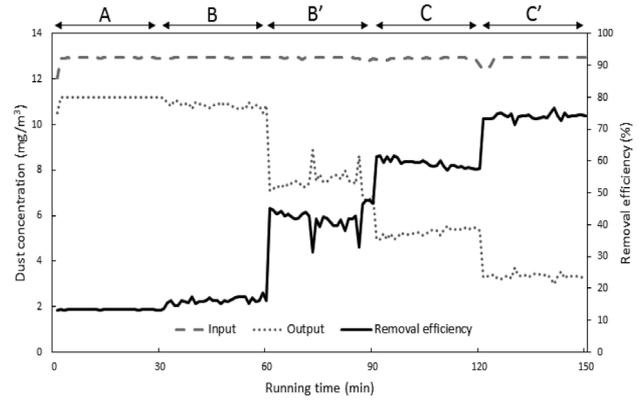


Fig. 7. Dust removal efficiency and effluent concentration at different distances from the mouth of dust inlet under the condition of 80 LPM of influent flow.

유입공기량을 80 L/min로 운전한 Fig. 7의 경우 전극간격 2 cm에서 전단에서는 약 20%, 후단에서 약 45% 제거되고 1 cm 전단에서는 60%, 후단에서는 75%로 최종 전극인 1 cm 후단에서도 유입공기량을 120 L/min보다 안정적인 제거효율을 보여 주었다.

결과적으로 전극을 이용하여 분진을 안정적으로 제거하기 위한 선속도는 6 cm/sec가 적당하다는 것을 알 수 있었다.

3.3. 분진부착량

Fig. 8~10은 각 유입유량 별로 분진제거효율 및 전극간격에 따른 분진농도의 변화를 알아 본 후 각 전극 간격 별 각각의 전극에 부착되는 최대 분진량을 알아보기 위하여 수행한 결과이다. 최대로 부착되는 양을 알기 위하여 Fig. 8, 9는 약 12시간 동안 장시간 운전 후 부착량을 측정하였고 Fig. 10은 약 4시간 30분으로 짧은 시간동안 운전하여 장시간 운전결과와 비교하였다.

각각의 그림에서 보는 바와 같이 전극판에 먼지의 부착은 중앙에 설치한 전극에 가장 많이 부착되고 중앙에서 멀어질수록 부착량이 적어지는 경향을 보여주고 있다.

Table 1은 각각의 유량에 따른 전극 간격별 먼지 부착량을 평균한 후 단위면적당 부착량으로 환산하여 요약한 결과이다.

장시간 운전한 유입유량 180 L/min 및 120 L/min에서 전극간격 3 cm 및 2 cm에서 각 간격 별 분진부착 총 무게는 전극간격이 가까울수록 증가함을 보였으나 단위 면적당 부

Table 1. Summary of attached dust mass at different gab of electrode-plate

Influent flow (L/min)	Total running time (hr)	Gab of electrode-plate							
		A (3 cm)		B' (2 cm)		C (1 cm)		C' (1 cm)	
		Total attached mass (mg)	Attached mass/area (mg/m ²)	Total attached mass (mg)	Attached mass/area (mg/m ²)	Total attached mass (mg)	Attached mass/area (mg/m ²)	Total attached mass (mg)	Attached mass/area (mg/m ²)
180	12	355	6,800	780	7,500	770	5,923	-	-
120	12	353	6,788	515	4,951	645	4,961	345	2,615
80	4.5	400	7,692	680	6,538	535	4,115	300	2,315

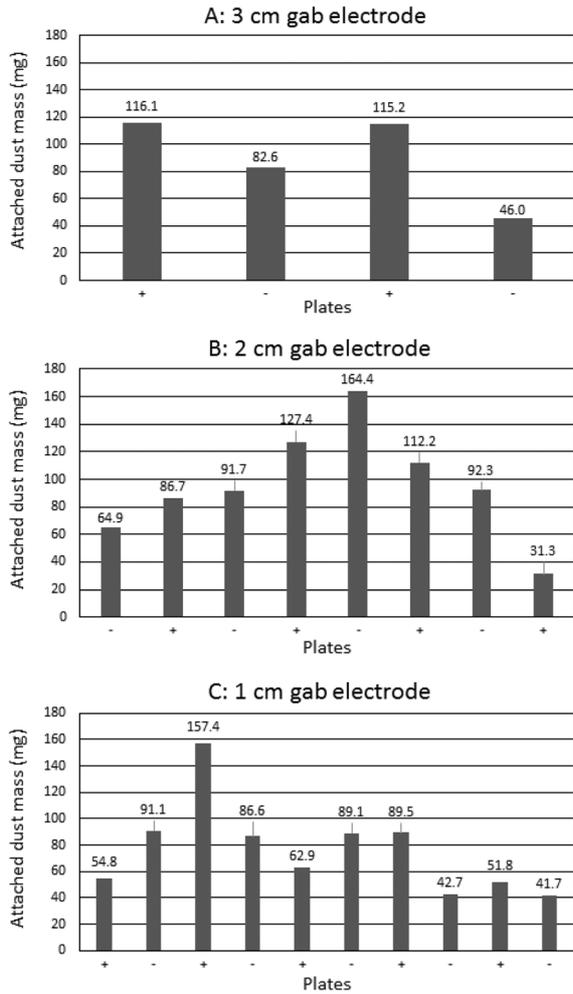


Fig. 8. Attached dust mass at different gab of electrode-plate under the condition of 180 LPM of influent flow.

차량은 감소하는 경향을 보였다. 전극간격 1 cm의 경우 비록 설치수가 많더라도 Table 1 및 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전극간격이 너무 가까우면, 분진 표면전하의 변동으로 분진의 교환이 일어나 제거효율이 더 낮아지는, 문제점이 우려되었다. 결과적으로 전극간격을 멀리하여 설치하면, 단위면적당 제거량은 증가하지만, 총제거량이 적어 처리효율이 낮아지고, 전극간격이 가까울수록 전극의 설치수가 증가하여, 제거량이 많기는 하지만 너무 가까우면, 표면전하의 변동으로 제거효율이 낮아지기 때문에, 제거효율을 높이기 위해서는, 전극간격은 2 cm로 함이 적당한 것으로 사료되었다.

본 실험결과에서 가장 안정적이고 이상적인 실험결과를 나타낸 유입유량 80 L/min의 실험결과에서도 마찬가지로 전극간격 3 cm 및 2 cm에서 단위면적당 분진제거량은 전극간격 3 cm에서 더 우수하나, 분진부착 총무게는 전극간격이 가까울수록 증가함을 보여서, 전극간격은 2 cm가 적당하다고 판단되었다.

3.4. 분진부착속도

분진의 부착은 전극판에 생성된 정전기력에 의해 부착하게 되며 이때 유입선속도 보다 정전기력에 의한 부착속도가 빨라야 한다. 분진의 최적부착 속도 산정시 가장 중요한 요소는 유입분진농도, 선속도, 전극간격 등이며 3.1절 및 3.2절의 실험결과에서 최적 선속도는 유입유량 80 L/min으로 운전한 6 cm/sec이고, 적정 전극간격은 2 cm였음을 실험적으로 도출하였다. 그리고 전극에 분진부착량 및 속도는 유입분진 농도별로 수행한 실험결과가 필요하나 본 연구에서 분진농도 변화 없이 수행하였지만 Table 1의 실험결과에서 유

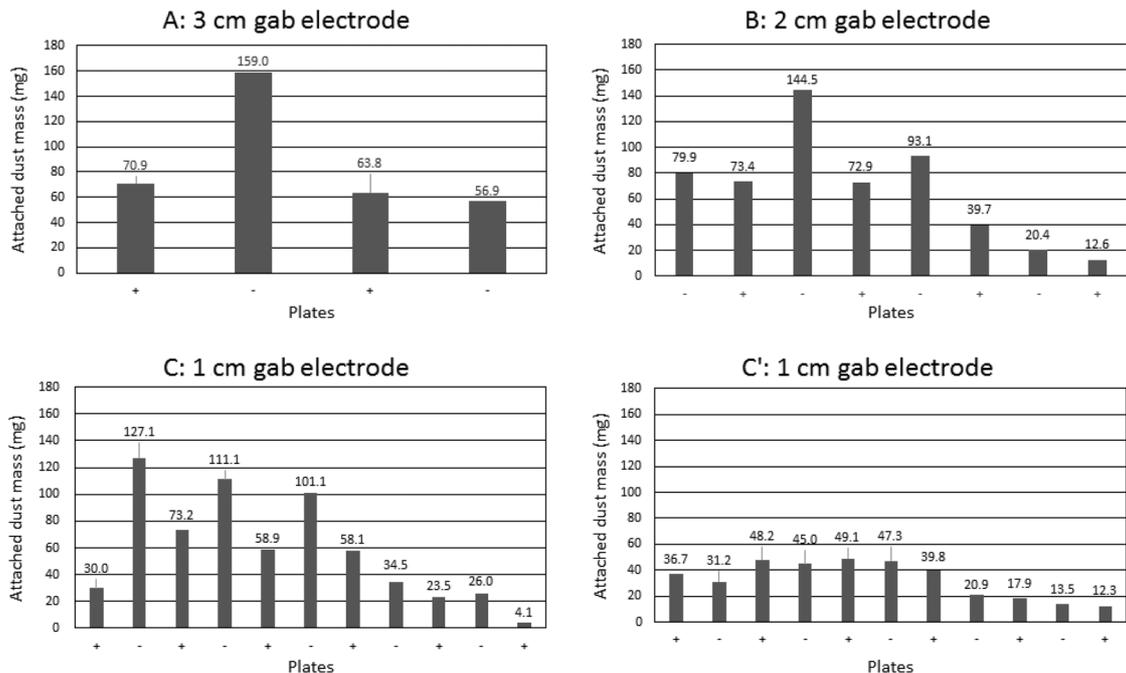


Fig. 9. Attached dust mass at different gab of electrode-plate under the condition of 120 LPM of influent flow.

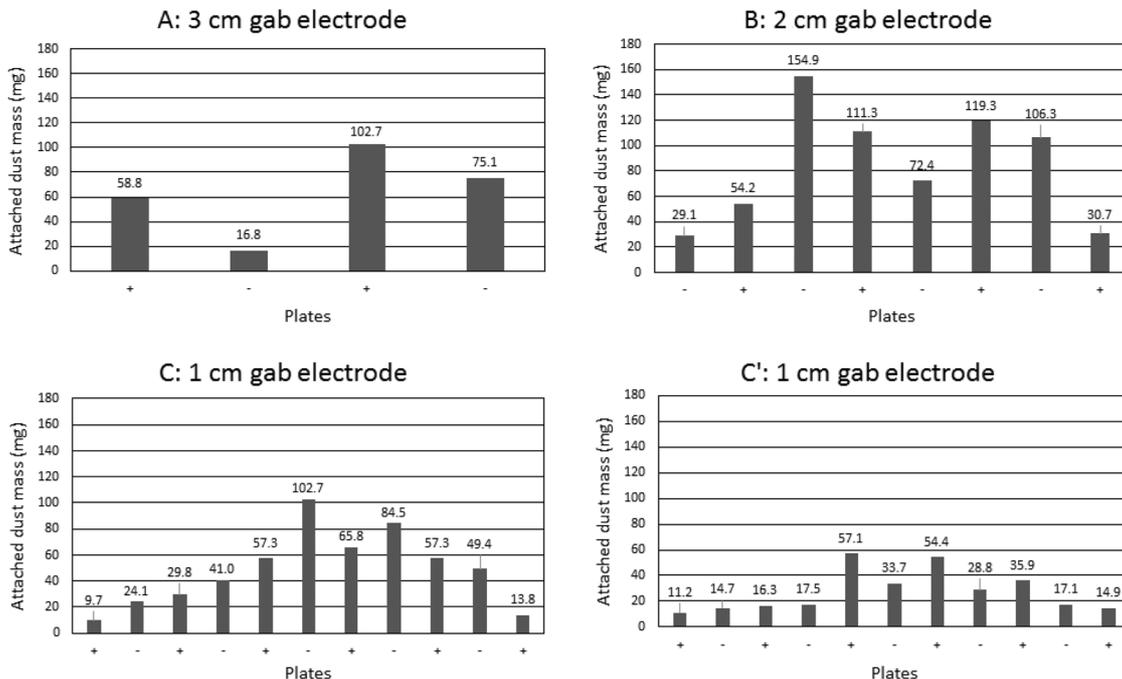


Fig. 10. Attached dust mass at different gab of electrode-plate under the condition of 80 LPM of influent flow.

입유량 80 L/min이고, 분진농도가 13 mg/m³으로 인 경우로 산정하면, 약 24 mg/min·m²임을 알 수 있었다.

4. 결론

활성탄 박판전극에 의한 분진제거능력을 알아보기 위하여 양전극과 음전극 간의 거리를 3 cm, 2 cm, 1 cm 순으로 배열하고, 유입유량을 변화시켜서 이에 따른 분진제거효율, 적정 선속도 및 적정 전극간격 등에 대하여 알아보았다.

분진 제거효율 실험결과에서 유입선속도는 6 cm/sec가 적정하였으며, 전극간격에 있어서 간격이 좁을수록 분진부착 총량은 증가하였으나, 전극간격이 1 cm로 너무 가까울 경우에는 부착된 먼지의 표면전하가 변화하여 역으로 탈착되는 현상을 보였다. 그 결과 적정 전극간격은 2 cm였으며, 이때의 분진부착 속도는 약 24 mg/min·m²임을 알 수 있었다.

사사

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유임무형사업“(2013-0048) 폴리머 기반 경량 방음벽 및 활성탄 박판 전극을 이용한 분진 제거 기술 개발(2)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

참고문헌

- Kim, S. C., Lee, T. J. and Kim, D. S., “Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Airborne Particulate Extracts by a GC/FID,” Proceedings of KSEE spring conference, (1995).
- Chai, M., Lu, M., Keener, T., Khang, S. J., Chaiwatpong-sakorn, C. and Tisch, J., “Using an improved electrostatic precipitator for poultry dust removal,” *J. Electrostat.*, **67**(6), 870~875(2009).
- Wang, Y., Gui, K., Shi, M. and Li, C., “Removal of dust from flue gas in magnetically stabilized fluidized bed,” *Particuol.*, **6**(2), 116~119(2008).
- Sharma, P. and Bhatti, T. S., “A review on electrochemical double-layer capacitors,” *Energy Conversion Manage.*, **51**(12), 2901~2912(2010).
- Korea Institute of Construction Technology (KICT), “Sound-proofing Plate with Thin Activated Carbon Film for Removal of Road Pollutants,” KICT 2010 Research report (2010).
- Calle, C. I., Buhler, C. R., McFall, J. L. and Snyder, S. J., “Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions,” *J. Electrostat.*, **67**(2-3), 89~92(2009).