

활성탄전극의 분진제거에 대한 기초연구

Preliminary Study on Dust Removal by Electrode-Plate Coated with Activated Carbon

김광수[†] · 박현철* · 전태환* · 이주행* · 김일호

Kwang Soo Kim[†] · Hyun Chul Park* · Tae Hwan Jun* · Ju Haeng Lee* · Il Ho Kim

한국건설기술연구원 환경연구실 · *과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

Department of Environmental Research, Korea Institute of Construction Technology

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

(2013년 10월 10일 접수, 2013년 10월 30일 채택)

Abstract : The purposes of this research are to know the optimal gap and electric pressure (voltage) of electrode-plates coated with activated carbon and also to study their arrangement through dust removal efficiency. From the experimental results of attached dust mass at different electrode-plate gap, the frequency of attachment and detachment of dust was more increased as electrode-plate gap was closer. In attached dust mass per unit area of electrode-plate, the farther electrode gap, the more increased. But in total attached dust mass, the closer electrode gap, the more removed. From the experimental results, the optimal electrode arrangement in dust removal chamber was considered that the forward parts of chamber need to be increased the number of electrode-plate, the backward parts to be increased them. The dust attachment have no relation with electric pressure while showing high removal efficiency under condition of 5 kV of voltage and 2 cm of electrode-plates gap.

Key Words : Electrode-Plate, Activated Carbon, Attached Dust Mass Per Unit Area, Optimal Electrode Arrangement

요약 : 본 연구의 목적은 분진제거를 목적으로 제작된 활성탄 전극의 적정 간격 및 적정 전압 그리고 분진 제거효율을 통하여 전극의 적정한 배열에 대하여 알아보고자 수행하였다. 여러 전극 간격 별로 수행한 실험결과로부터 분진의 부착 및 탈착의 빈도수는 전극의 간격이 가까워질수록 증가하였다. 전극 단위면적 당 분진 부착량은 전극간격이 멀어질수록 증가하였지만 총 부착량에 있어서는 전극간격이 가까울수록 전극의 설치수가 많아져서 증가하였다. 이와같은 실험결과로부터 분진제거 챔버에서 전극의 설치간격은 앞단의 경우는 분진 부착량이 높기 때문에 제거량이 많도록 전극의 간격을 멀리하고 후단은 제거효율을 높이기 위하여 전극간격을 가깝게 설치하는 것이 바람직하다고 사료되었다. 그리고 전압 5 kV, 전극간격 2 cm에서 전압의 변화에 따른 분진부착량 실험결과에서 전압의 변화와 부착량과는 상관관계가 없었다.

주제어 : 전극판, 활성탄, 단위면적 당 분진부착량, 적정전극배열

1. 서론

정전기적 침전에 의한 분진제거는 전기적으로 충전된 입자와 반대의 전하를 띠는 집진극 간의 상호인력에 의하여 이루어진다. 정전기적 집진방법은 대량의 가스를 취급할 수 있으며 1 μm 이하의 입자도 높은 효율로 제거할 수 있을 뿐만 아니라 에너지 소모와 압력손실이 적고 비교적 높은 온도의 가스도 취급할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 정전 집진기는 각종공장에서 많이 이용되며 특히 제철소 및 화력 발전소에서 가장 많이 채택된다.¹⁾

전기집진장치는 크게 코로나 방전을 일으켜 분진에 하전 이 띠도록 하는 대전실과 대전된 분진을 전극판에 부착시켜 제거하는 분진 제거실로 구성되어 있다. 그러나 이러한 전기집진장치에서는 코로나(corona) 방전 시 고압의 직류전류가 요구되어 많은 전기가 소요되는 문제점이 있다. 또한, 전기집진장치의 전극판은 통상 스테인레스 스틸 또는 철판 등을 이용하는데, 통상의 철판은 분진이 부착되는 비표면적이 낮고 전류밀도가 전극판의 엣지(edge)에만 집중되어 전

극판 표면에 고르게 부착되지 않는 문제점이 있다.²⁾

상기한 종래의 문제점을 해결하기 위한 방안으로, 전극판의 비표면적을 증가시켜 분진의 부착면적을 증대시키고, 전류밀도를 전극판에 고르게 분포시켜서³⁾ 분진의 부착이 한 곳에 편중되지 않고 균일하게 부착되도록 하고자 하였다. 그 방안으로 활성탄을 개질하여 전기 저항값을 낮추고, 결합재(binder)를 사용하여도 활성탄 세공을 이용한 고유기능이 살아있는 활성탄을 박판으로 코팅한 활성탄 전극을 개발하여 알루미늄 전극과 활성탄을 코팅한 전극과의 분진 부착 능력을 비교한 실험결과에서 활성탄을 코팅한 전극이 약 4 배 정도 분진 부착량이 많음을 확인한 바 있다.⁴⁾ 정전기를 이용한 분진제거에 있어서 전극에서의 분진의 부착 및 탈착에 관한 연구는 국·내외적으로 사례가 매우 드물며 특히 활성탄을 전극판으로 제작하여 분진제거를 수행한 연구 사례는 전무하다. 정전기를 이용한 분진제거에 있어서 가장 중요한 설계인자는 양전극과 음전극 간에 전극간격 및 직류 전원에 의해 공급되는 전압이다.⁵⁻⁷⁾

본 연구에서는 분진제거를 목적으로 제작된 활성탄 전극

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

의 적정 간격 및 전압 그리고 전극의 적정한 배열 등 활성탄 전극의 분진제거에 관련된 기초 인자에 대하여 실험연구를 통하여 알아보고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 활성탄 전극의 제조

활성탄에 접착제를 주입하여 박막의 필름이 제조되어도 활성탄의 기공이 막혀 있으면 활성탄 전극의 역할이 저하되므로 접착제를 주입하여도 이를 개공시킬 방법을 강구하여야 하였다. Fig. 1은 접착제 주입 후 분말활성탄 세공을 개공하는 절차 및 전극판 제작에 대하여 나타난 것이다.⁴⁾

우선 산 세척한 활성탄을 200℃의 건조기에 두어서, 활성탄 세공의 기체 및 휘발성 물질을 제거한 후, 분말활성탄은 밀폐된 용기에 넣고 접착제에 사용된 것과 같은 용매제(메탄올)를 주입한 후 약 1기압의 압력을 가하여 강제로 세공에 용매제를 주입하였다. 본 연구에서는 약 1 L의 아크릴용기에 분말활성탄 및 메탄올을 넣고 질소가스가 충전된 봄베의 압력을 이용하였다. 약 1일간 메탄올을 충전 후 여과시킨 활성탄은 접착제(PVA, polyvinyl acetate)와 혼합 후 제조된 전극판의 크랙(crack)을 방지하기 위하여 상온에서 약 2시간 건조시켰다. 활성탄 기공에 갇혀 있던 메탄올을 휘발

시키기 위하여 메탄올의 휘발점보다 훨씬 높은 약 100℃에서 약 1시간 추가 건조시켰다. 건조과정에서 활성탄 세공은 그대로 살아 있고 접착제는 굳어짐을 이용하는 방법으로 제작하였다. 활성탄과 PVA의 배합비(무게비)는 1 : 0.2-0.3이 적당하였고 black carbon을 전기전도도를 향상시키기 위하여 주입하였다.

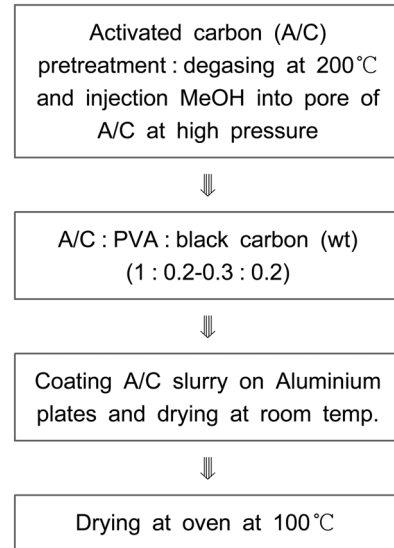
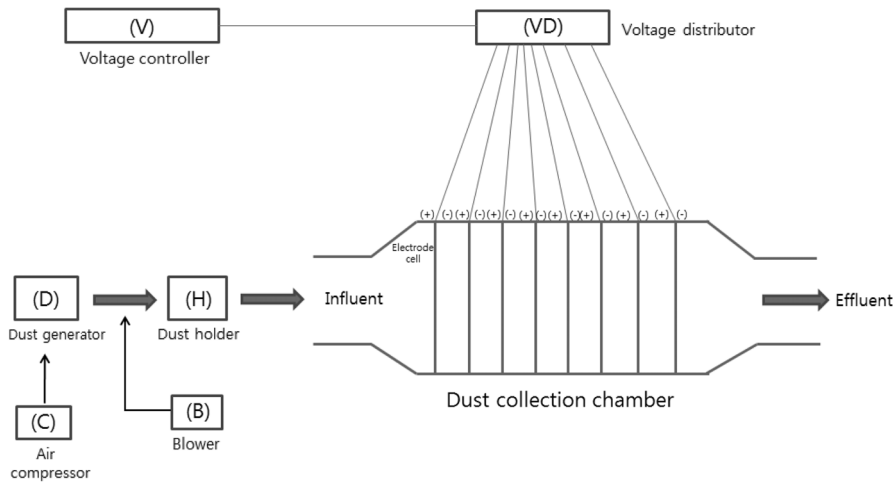
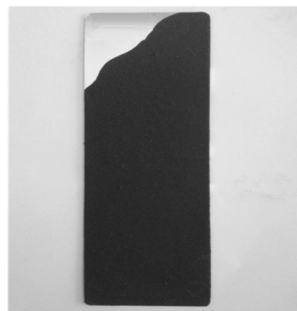


Fig. 1. Preparation of electrode-plate coated with activated carbon for dust removal.



Electrode cell



Electrode coated with Activated carbon

Fig. 2. Schematic diagram of dust removal chamber installed with activated carbon coated electrode-plate.

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. 분진발생 원리는 다음과 같다. 컨베이어에 의해 이송된 분진은 콤프레셔의 유압에 의해 유동되는 모래층(sand bed)로 유입되어, 분진이 발생되며 발생된 분진은 홀더로 유입된 후, 홀더에서는 추가로 blower에 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 모듈(W 15 cm \times H 15 cm \times L 10 cm)로 구성하고, 각각의 모듈은 2개의 셀(cell, W 14.5cm \times H 14.5 cm \times L 4.5 cm)이 안착될 수 있도록 하였다. 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. 유출부는 유입부와 마찬가지로 콘 형태로 제작하였다.

Fig. 2는 실험장치 전체모형, 모듈, 셀 그리고 전극의 크기에 대하여 나타낸 것이다.

2.2.2. 실험방법

1) 전극 간격 별 분진부착 누적량

전극판에 최대 부착될 수 있는 분진량을 알아보기 위하여 유입 분진농도는 약 8 mg/m^3 , 선속도는 8 cm/sec , 전압은 5 kV로 유지하고 전극 간격을 3 cm, 2 cm, 1 cm로 각각 설치하여 각 간격 별로 시간에 따른 누적 분진량을 측정하였다. 간격 3 cm의 경우 셀에 전극을 양전극-음전극을 각각 한 쌍을 설치하였고, 간격 2 cm의 경우는 셀에 양전극-음전극을 각각 3쌍 그리고 간격 1 cm인 경우는 4쌍을 설치하여 수행하였다. 부착된 분진은 제거하지 않고 누적시간 별로 측정하였다.

2) 전극 간격 별 분진 부착량

전극의 운전조건은 1)의 전극 간격 별 분진부착 누적량 실험방법과 동일하게 유지하고 1시간 운전 후 부착분진을 제거하고, 3시간 운전 후 다시 제거하여 운전시간에 따른 분진 부착량을 산정하였다.

3) 전극 간격 별 전압변화에 따른 분진 부착량

유입 분진농도는 약 8 mg/m^3 , 선속도는 8 cm/sec , 전극 간격을 3 cm, 2 cm, 1 cm로 설치하고 각 간격별로 전압은 3 kV, 5 kV, 7 kV 및 9 kV로 변화시켜서 전압변화에 따른 분진 부착량을 알아보았다.

4) 분진 제거효율 실험

1)~3)에서 수행한 전극의 전압변화 및 전극간격 별 분진 부착량 등의 실험결과를 기초하여 전극을 설치하고 분진 제거효율 실험을 수행하였다.

전극설치는 Fig. 2의 chamber에 전반부는 전극 간격이 3 cm인 2개의 모듈을 직렬로 설치하고, 앞단과 후단의 각각의 모듈에서 전극판은 분진이 최대한 충돌하도록, 서로 교차되지 않도록 설치하였다. 중반부는 전극간격을 2 cm 그리고 후반부는 전극간격을 1 cm로 하여 각각의 모듈은 2개로 설치하고, 전극판은 3 cm의 경우와 마찬가지로 서로 교차되지 않도록 배치하였다. 그리고 각 전극모듈에는 분진 샘플 포터를 설치하여, 거리에 따른 분진 제거효율을 알아보았다. 유입공기량은 약 180 L/min로 주입하여 선속도는 약 6 cm/sec 였으며, 주입분진 농도는 평균 약 10 mg/m^3 를 유지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 누적 분진부착량

Fig. 3은 전극에 누적될 수 있는 최대 분진량을 알아보기 위하여 각 전극간격 별로 수행한 실험결과이다. 각 전극의 간격 별 설치 수는 전극간격 3 cm에서는 양-음전극 2쌍, 2 cm에서는 3쌍, 1 cm에서는 4쌍을 설치하여 수행하였다. 전

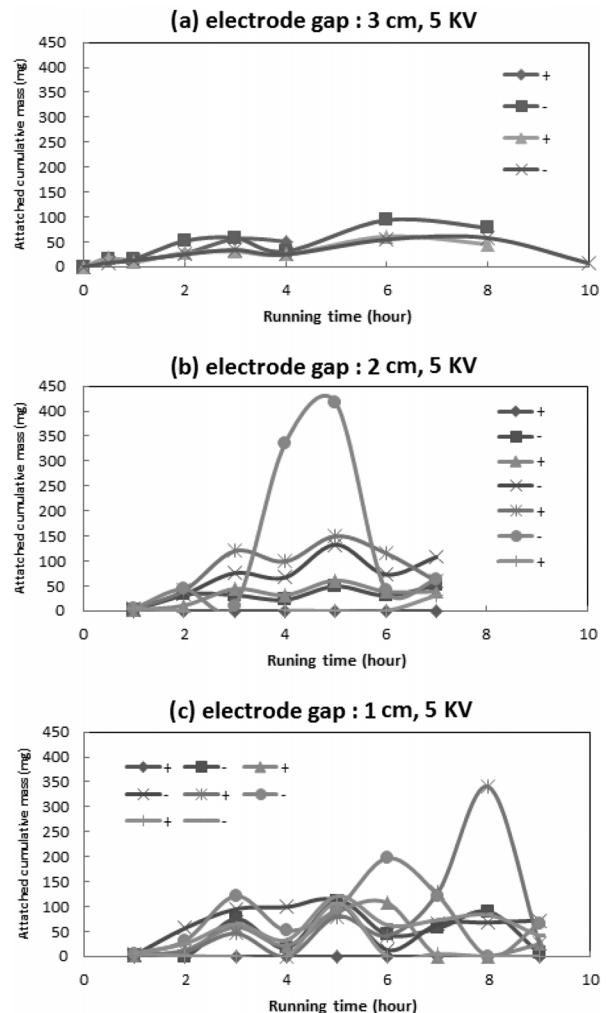


Fig. 3. Cumulative attached dust mass to different gap between positive and negative electrodes.

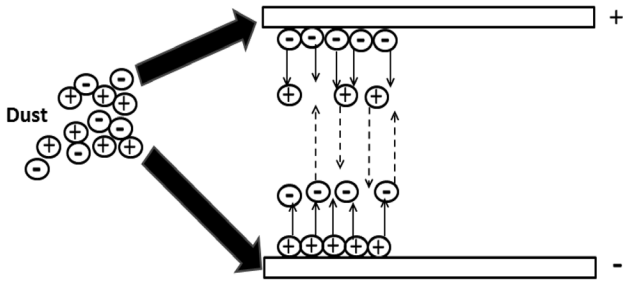


Fig. 4. Hypothetical movement of charged dust at positive and negative electrodes.

극간격 3 cm에서 운전시간이 지남에 따라 먼지 부착량은 점차 증가하다가 약 4시간 운전 후에는 감소 추세를 보였으며, 그 이후에는 다시 증가 추세를 보였다가 약 8시간 운전 후에는 다시 감소함을 보여주었다. 전극간격 2 cm에서도 마찬가지로 초기에는 점차 증가하다가 약 2시간 후에는 감소하였으며, 다시 증가하다가 역시 4시간에서는 감소하였으며, 6시간에서도 유사한 경향을 보였다.

전기집진장치의 경우 방전에 의해 공기가 이온화되면 이온화된 공기는 분진입자를 음이온으로 충전시키고, 음이온의 분진입자는 양전극으로 이송되어 제거된다. 양전극에 쌓인 분진입자는 충격을 주어 떨어내어 호퍼에 저장된다. 하지만 이 과정에서 분진의 전기저항도가 10^4 ohm/cm 이하이면 호퍼에 저장된 침전분진이 양전극으로 다시 끌려가서 제진효율을 나쁘게 하는 문제점이 있다. 반면에 전기저항도가 10^{10} ohm/cm 이상으로 너무 크면 코로나 방전에 소요되는 전력이 더 많아지고 양전극에 쌓인 분진은 역이온화(back ionization) 현상이 일어나 제진효율은 저하 된다.^{8,9)} 본 실험에서는 코로나 방전에 의한 공기의 이온화는 없었지만 분진이 장기간 동안 양전극 및 음전극에 누적될 경우 분진의 부착 및 탈착이 반복되는 이유를 상기의 역이온화 현상을 기초하여 Fig. 4에서와 같이 추론할 수 있었다. 유입 분진 중 표면전하가 양이온인 경우는 음전극에 부착되고 표면전하가 음이온인 분진은 양전극에 붙게 되는데 탈착 없이 장기간 운전 시 양전극에 부착된 분진의 표면전하는 양이온으로 전환되고 음전극에 부착된 분진의 표면전하는 음이온으로 전환되어 표면전하의 역류 때문에 탈착 및 부착이 반복되는 것으로 사료되었다.

결과적으로 먼지가 전극판에 누적되면 음극과 양극판의 거리가 가까울수록 전극판으로의 먼지의 부착 및 탈착의 빈도수가 증가함을 알 수 있었다.

3.2. 각 극판의 분진부착량

3.1절에서는 극판에 분진이 계속 누적되면 분진표면의 전하가 역전되어 분진의 역류가 발생하는 것으로 사료되어 본 절에서는 누적량을 측정하지 않고 매시간 측정 후 분진을 떨어내어 시간에 따른 전극에 부착된 분진량에 대하여 알아보았다.

Fig. 5는 분진제거 양-음전극을 3 cm 간격으로 4쌍을, 2 cm 간격으로는 6쌍 그리고 1 cm 간격으로는 8쌍을 설치하고 전

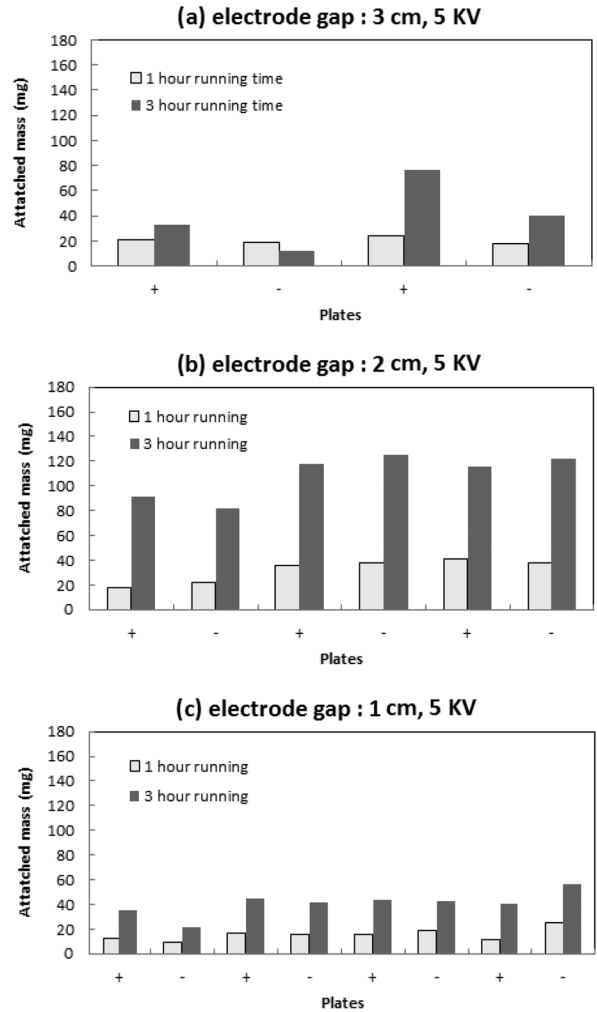


Fig. 5. Attached dust mass to different gap between positive and negative electrodes at operation time of 1 hr and 3 hr.

간격 각각에 대하여 시간별 무게 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 각 간격별 운전시간 1시간에서 부착량의 큰 차이를 보이지 않았으나, 3시간 운전에는 큰 차이를 보였다. 3 cm의 경우는 최대 분진부착량이 약 80 mg, 2 cm의 경우는 약 120 mg, 1cm의 경우는 약 60 mg으로 전극 간격 2 cm가 가장 높은 부착량을 보여 주었다. 그리고 각각의 양전극 및 음전극의 분진부착량을 비교하여 보면 통상 분진의 표면전하는 음이온을 나타내어 양전극에 더 많은 양의 분진이 부착할 것으로 예상하였으나, 양전극 및 음전극에 관계없이 부착량은 유사함을 알 수 있었다. Fig. 6은 각각의 전극에 부착된 총 분진량을 요약하여 나타낸 것으로 총 부착량에 있어서도 마찬가지로 전극 간격 2 cm가 가장 높은 부착량을 보여 주었다.

Fig. 7은 상기의 운전시간 1시간 및 3시간 외에 추가로 운전시간 별로 분진부착량이 가장 많은 전극을 대상으로 분진부착량을 나타낸 것으로 전극 간격 3 cm인 경우 초기에는 증가하다가 운전시간이 지남에 따라 점차 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 전극 간격 2 cm에서는 전극간격

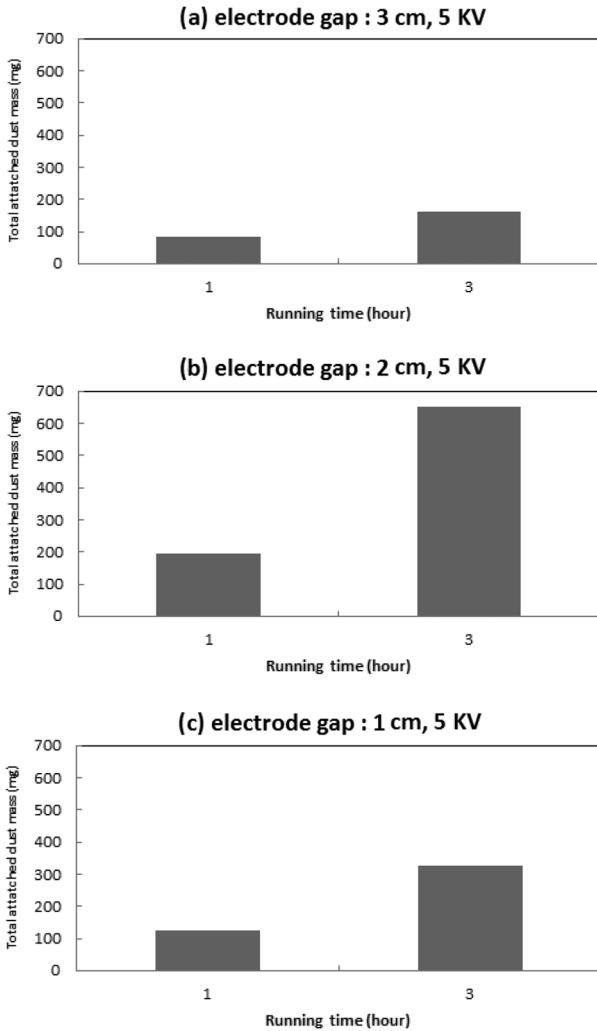


Fig. 6. Total attached dust mass to different gab between positive and negative electrodes at operation time of 1 hr and 3 hr.

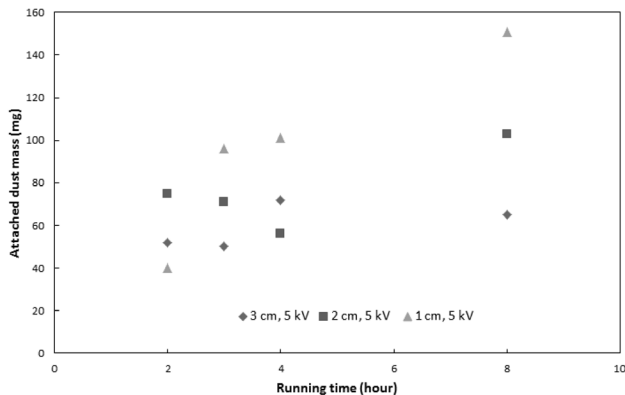


Fig. 7. Variation of attached dust mass to different gab between positive and negative electrodes at different operation time.

3 cm에서 부착량이 증가하면 2 cm에서는 큰 변화가 없고 3 cm에서 부착량이 감소하면 2 cm에서는 증가량을 보였으며 2 cm 및 1 cm에서도 마찬가지로 경향을 보였다.

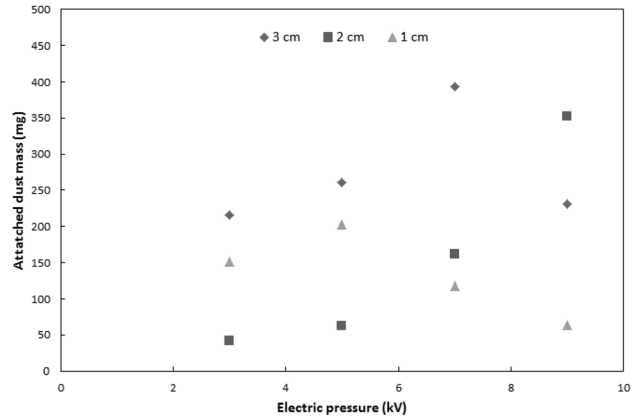


Fig. 8. Variation of attached dust mass to different gab between positive and negative electrodes at different electric pressure (voltages).

결론적으로 상기의 실험결과로 보아 분집 유입 선속도가 8 cm/sec일 경우 전극 간격 2 cm가 유입선속도보다는 정전기에 의해 부착되는 속도가 더 빨라서 분진부착량은 가장 많으나, 전극배열에 있어서 부착된 먼지는 표면전하의 역류 현상에 의하여 탈착이 우려됨으로, 후단으로 갈수록 전극의 간격을 좁혀서 부착면적을 증가시켜 설치하는 것이 바람직하다고 사료되었다.

3.3. 전압 별 분진부착량

Fig. 8 각 전극 간격 별로 전극의 전압을 3 kV, 5 kV, 7 kV, 9 kV로 변화시켜서 분진 부착량을 알아본 결과이다.

전극간격 3 cm 인 경우는 전압 별로 큰 차이는 없으나 2 cm의 경우는 전압이 높아질수록 증가하는 추세를 보였다. 반면에 1 cm의 경우는 5 kV까지는 증가하는 추세를 보였으나, 7 kV 및 9 kV에서는 감소하는 추세를 보였다. 이는 전술한 바와 마찬가지로 표면전하의 역류 때문인 것으로 사료되며, 표면전하의 역류는 전극 간격뿐만 아니라, 전극간격이 좁을 경우는 전압이 높을수록 증가함을 알 수 있었다.

따라서 정전기를 이용한 전극판에서 적정 전극간격은 2 cm 또는 1 cm 그리고 적정 전압은 5 kV였다.

3.4. 분진제거효율

Fig. 9는 전극판을 직렬로 설치하고, 후단으로 갈수록 전극 간의 간격을 3 cm, 2 cm 그리고 1 cm로 좁혀서 분진과의 접촉을 늘리는 점층식 배열에 의해 수행한 결과이다.

유입분진 농도는 8-12 mg/m³ 범위로 유입하였다. 그리고 총운전 시간 150분 동안 전극간격 및 유입구로부터 거리에 따른 먼지 제거효율을 나타내었다.

전극간격이 3 cm인 전반부에서의 제거효율은 7-8%, 전극간격이 2 cm인 중반부에서는 20-30% 그리고 전극간격이 1 cm인 말단부에서 첫 번째 모듈은 약 50% 이어서 두 번째 모듈에서는 72%로 후단으로 갈수록 제거효율이 증가함을 알 수 있었다.

한편 Fig. 10은 각 전극 간격 별로 부착된 각 전극 당 분

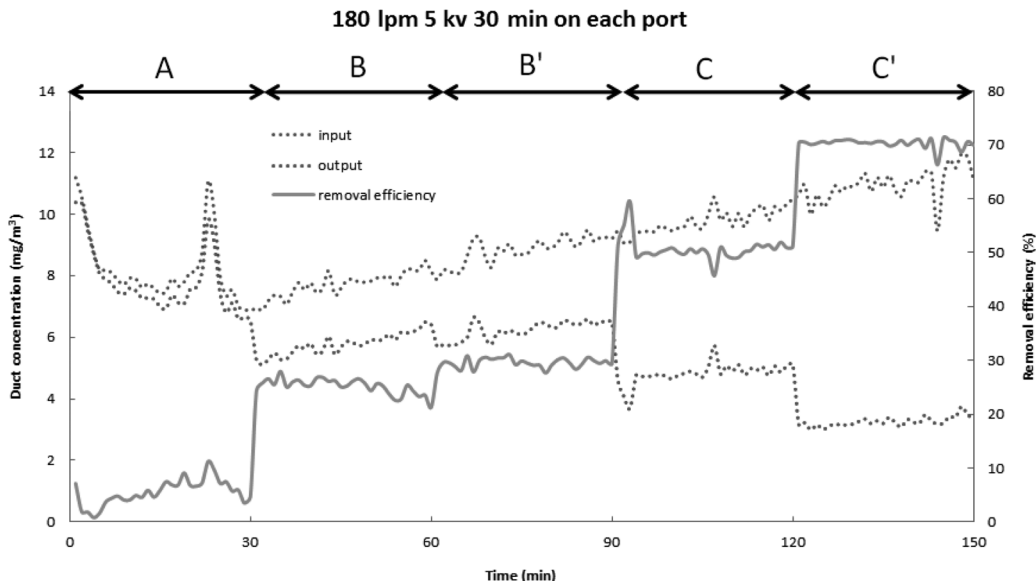


Fig. 9. Profile of effluent dust concentration at different electrode gap in order of 3 cm, 2 cm, and 1 cm in series.

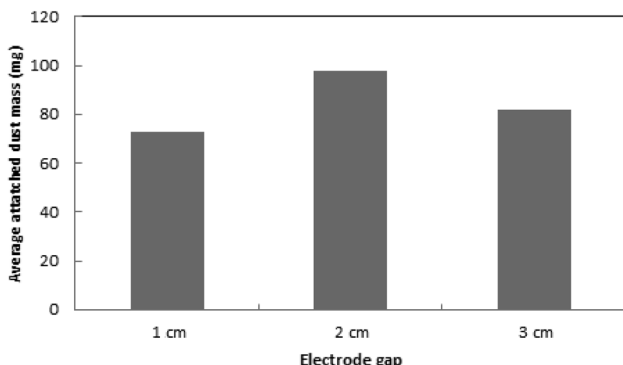


Fig. 10. Average mass of attached dust at different electrode gap.

진량을 측정 후 평균하여 나타낸 것이다.

전극간격 3 cm 에서 전극은 4개, 2 cm에서는 8개, 1cm에서는 10개를 설치하였으며, 단위 전극 당 평균부착량은 전극간격 3 cm에서는 80 mg, 2 cm에서는 95 mg, 1 cm에서는 70 mg를 나타내어 전극간격 2 cm에서 가장 많은 부착량을 보였고 1 cm에서 가장 적은 부착량을 보였다. 이의 결과를 Fig. 9의 분진제거효율과 비교하여 보면 후단으로 갈수록 제거효율이 높아서 전극간격 1 cm에서 분진 부착량이 가장 높아야 하지만 반대의 경향을 보여 주었다. 이는 전극간격 3 cm에서는 전극수가 4개지만 1 cm에서는 10개여서 다시 말하여 전극수가 적으면 부착량은 많지만 총제거량이 적고 전극수가 많으면 부착량은 적지만 총제거량은 많음을 보여 주어서 분진제거효율을 높이기 위해서는 전극간격을 줄여서 설치수를 늘리는 것이 바람직하다고 사료되었다.

4. 결론

본 연구에서 활성탄으로 표면이 코팅된 전극을 이용하여

전극 간격 별, 전압 별 분진 부착량 그리고 이의 결과를 기초로 전극의 적정 배열에 대하여 알아보았다.

전극 간격 별 분진 부착량에 있어서 양전극 및 음전극의 간격이 가까울수록 전극에 부착된 분진의 표면전하의 변화로 탈착 및 부착의 빈도가 높았다. 분진의 부착량에 있어서 단위전극당 분진 부착량은 양전극과 음전극간에 거리가 멀수록 부착량은 높았으나 총 제거량에 있어서는 전극간에 거리가 가까울수록 커져서 전극의 배열은 전단보다는 후단으로 갈수록 간격을 좁혀서 설치하는 것이 바람직한 것으로 사료되었다. 그리고 전압의 변화에 따라서는 부착량에 큰 변화가 없었으나 5 kV에서 가장 안정적인 부착량을 보였으며 이때의 가장 높은 분진 부착량을 보여준 전극간의 간격은 2 cm였다.

사 사

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

1. 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).
2. Wang, Y., Gui, K., Shi, M. and Li, C., “Removal of dust from flue gas in magnetically stabilized fluidized bed,” *Par-*

- ticuol.*, **6**(2), 116~119(2008).
3. Sharma, P. and Bhatti, T. S., "A review on electrochemical double-layer capacitors," *Energy Conversion Manage.*, **51**(12), 2901~2912(2010).
 4. Korea Institute of Construction Technology, "Soundproofing Plate with Thin Activated Carbon Film for Removal of Road Pollutants," Research report (2010).
 5. Norbert, G., "Static Electricity-An Industrial Hazard under Control," *J. Electrostat.*, **40&41**, 1~30(1997).
 6. Rincon, J., "Removal of fine particles in a magnetically stabilized fluidized filter," *Sep. Sci. Technol.*, **28**(6), 1241~1252 (1993).
 7. Hristov, J. Y., "Magnetic field assisted fluidization-A unified approach. Part 1. Fundamentals and relevant hydrodynamics," *Rev. Chem. Eng.*, **18**(4-5), 295~509(2002).
 8. 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).
 9. Cohen, A. H. and Tien, C., "Aerosol filtration in a magnetically stabilized fluidized bed," *Powder Technol.*, **64**, 147~158(1991).