활성탄 박판전극 및 유전체 교대배열에 의한 파일럿 플랜트 규모 전기집진장치에서의 미세먼지 제거

Dust Removal of Electrostatic Precipitator equipped with Alternation of Activated Carbon Coated Electrodes and Dielectric Panels in Pilot Plant

김수호*** · 배지열* · 김광수***,†

Suho Kim*** · Jiyeol Bae* · Kwang-Soo Kim***,†

*한국건설기술연구원 국토보전연구본부 · **과학기술연합대학원대학교 건설환경공학

*Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

**University of Science and Technology (UST)

(Received February 5, 2018; Revised March 7, 2018; Accepted May 10, 2018)

Abstract : In this study, the dust removal efficiency from polluted air was investigated using an electrostatic precipitator, which was equipped with alternation of activated carbon coated electrodes and dielectric panels, without corona discharge process. The mixture of activated carbon and organic binder, poly vinyl acetate (PVAc), was coated onto stainless steel sheets to produce an activated carbon coated electrode. The attached activated carbon on stainless steel sheet exhibited 80% BET surface area of the powdered activated carbon. It was verified that the pore characteristics were still maintained without altering its hardness. It was confirmed by keeping the activated carbon coated electrodes in the atmosphere as well as in water for a prolonged period of time. In addition, a pilot plant scale electrostatic precipitator was fabricated, by alternately inserting activated carbon coated electrodes and dielectric panels to measure the removal efficiency of dust particles. Regardless of the concentration of the incoming dust, electrostatic precipitator discharged a very low concentration of dust and the removal efficiency was consistent. The high dust removal efficiency was observed when the voltage applied was 5 to 8 kV, and the higher the voltage applied, the higher was the removal efficiency. The dust removal efficiency was measured at different linear velocities. About 98% removal was recorded at 10 cm/s, and the removal efficiency decreased when the linear velocity was increased. The adsorption pattern of attached dust to the electrode and dielectric panels was identified. About 70% of the total absorbed dust was collected in the first stage cage and the dust was evenly adsorbed onto the electrode and dielectric panel. The electrostatic precipitator developed in this study showed a high dust removal efficiency as the dust detachment by discharge was not occurred.

Key Words : Activated Carbon Electrode, Dielectric Panels, Dust Removal, Linear Velocity, Electrostatic Precipitator

요약 : 본 연구에서는 코로나(corona) 방전에 의존한 기존의 분진 집진장치의 단점을 보완하고자 활성탄 코팅 전극을 활용하여 정전기를 이용한 전기 집진장치를 개발하는 연구를 수행하였다. 활성탄과 바인더를 혼합하여 스테인레스 박판의 표면에 코팅한 활성탄 박판을 개발하였으며, 활성탄 코팅 전극과 유전체를 교대로 배열한 파일럿 플랜트 규모의 전기 집진장치를 제작하여 분진제거 효율을 측정하였다. 개발된 활성탄 박판전극에 부착된 활성탄은 코팅 후에도 기존 활성탄 대비 80%의 비표면적을 유지하며 기공이 폐색되지 않고 유지되는 열린 기공구조를 보였다. 활성탄 코팅 박판을 대기중과 수중에 각각 장기간 방치한 후에도 정도의 변화없이 안정적으로 물리적 특성이 유지됨을 확인하였다. 활성탄 코팅 전극과 유전체가 교대로 배열된 전기집진장치를 운전한 결과, 전압을 5~8 kV로 인가하였을 때 최적의 분진제거효율을 나타내었다. 분진제거 효율의 특성평가 결과, 선속도가 10 cm/s일 때 98%를 보였으며, 선속도가 증가함에 따라 제거효율도 감소됨을 확인하였고, 선속도를 142 cm/s로 운전하였을 때에도 93%의 높은 제거효율을 나타내었다. 전기집진장치의 분진 부착 경향을 확인한 결과 총 흡착분진의 70%가 1단 케이지에 집진되었으며, 박판전극과 유전체 패널에 고르게 분진이 부착됨을 확인하였다. 본 연구수행을 통해 개발된 활성탄 코팅 전극은 전류가 골고루 분포되었고, 방전에 의한 분진의 탈리가 발생되지 않아 높은 분진 제거효율을 보임을 확인하였다.

주제어 : 활성탄 전극, 유전체, 분진제거, 전기집진장치

1. 서론

산업의 발달로 도시화 및 공업화가 심화됨에 따라 자동차 및 공장의 매연은 주변 실내 생활공간뿐 아니라 터널, 지하철 역사, 극장 등 공공 생활공간에서 문제가 되고 있다.¹⁾ 이와 같은 대기오염물질의 주요구성 물질은 미세먼지, 휘발성 유기물질 및 악취 등이 있다. 대류와 확산이 급격하게 일어나는 지역과 달리, 터널 내부에서는 이동수단의 증

가에서 기인한 대기오염물질이 고농도로 농축되어 잔류하고 있다.²⁾ 특히 터널에 농축된 대기오염물질들은 터널 주변에 거주하는 주민이나 운전자의 건강에 상당히 유해할 수 있어, 이에 대한 대기환경기준물질의 규제 또한 강화되고 있는 실정이다. 또한 차량에서 발생되는 배기가스는 지구온난화의 주범일 뿐 아니라 발암성분도 가지고 있어 반드시 해결해야 할 문제이다.³⁾ 터널뿐만 아니라 폐쇄형 건설 현장이나 지하철도 등 환기가 되지 않는 공간의 대기오염

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

물질의 제어를 위한 연구가 요구되는 이유이다.⁴⁾

종래의 미세먼지물질을 제거하는 대표적인 방법으로 전기집진(electrostatic precipitator) 방법이 있다. 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.⁵⁾ 그러나 전기집진장치에서는 코로나(corona) 방전 시 고압의 직류 전류가 요구되어 많은 전기가 대량 소요되는 문제점이 있고, 전기집진장치의 전극판은 통상 스테인레스 스틸(Stainless steel) 또는 철판 등을 이용하는데, 철판은 먼지가 부착할 수 있는 비표면적이 낮고 전류밀도가 전극판의 엣지(edge)에만 집중되어,⁶⁾ 전극판 표면에 고르게 부착되지 않는 문제점이 있다.⁷⁾ 또한 기존 전기집진장치는 집진용량이 증가하여 전극표면의 먼지 케이크가 두껍게 쌓이게 됨에 따라 인접한 전극의 영향으로 집진된 먼지가 다시 탈리되는 역전리(back discharge) 현상이 발생하게 되는 단점이 있다.^{8,9)}

이에 기존의 전기집진장치를 보완하여 알루미늄 판에 활성탄을 코팅하여 전극판에 전류를 끌고루 분포시키고 비표면적을 증대시킨 전극이 개발되어 코로나 방전 없이도 탁월한 먼지제거 효과를 갖는 활성탄 박판 기반 전기집진장치가 최근 개발되었다.¹⁰⁾ 또한 역전리 현상의 극복을 위해 Kim 등¹⁰⁾은 전극 사이에 부도체 판넬을 삽입한 실험실 규모의 집진장치를 개발하여 집진기 운전 시 부도체가 유전체로 작용하여 역전리 현상을 억제해 주는 동시에 집진전극과 유사한 성능을 보이게 되어 결과적으로 집진의 성능을 크게 향상시킨 연구결과를 보고하였다.

이에 본 연구에서는 그 동안 실내용 실험규모로만 수행하였던 결과를 파일럿 플랜트 규모에서 수행하여 코로나 방전없이 활성탄이 코팅된 전극과 부도체를 정전유도체로 이용하여 미세먼지제거가 가능한지를 알아보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 활성탄 전극의 제조 및 특성평가

활성탄 전극 제조 시 활성탄 코팅을 위한 지지체로 50 cm × 50 cm 크기의 스테인레스 스틸 강판을 사용하였으며, 활성탄 코팅을 위한 바인더제로써 비닐계인 PVAc (poly vinyl acetate)를 사용하였다.¹¹⁾ 먼저 PVAc 바인더제를 용매제인 메탄올 용액에 완전히 용해시킨 뒤, 분말활성탄을 첨가하여 활성탄 세공에 메탄올이 충전될 수 있도록 교반시켰다. 충분히 교반한 용액에 스테인레스 강판을 코팅시킨 후, 세공의 메탄올을 휘발시키기 위해 메탄올의 휘발점보다 훨씬 높은 약 120°C에서 약 4시간 건조시켰다. 활성탄과 PVAc와의 배합무게 비는 1 : 0.2 ~ 0.3로 설정하였다. 원료 분말활성탄과 바인더가 첨가된 전극박판의 활성탄과의 공극특성을 평가하기 위해 비표면적(BELSORP-MAX, BEL Japan Inc, Japan), 공극부피, 기공크기를 측정하였고, 전자현미경

(S-4800, HITACHI, Japan)을 이용하여 활성탄 코팅 박판 표면 및 활성탄의 기공을 관찰하였다.

2.2. 전극/유도체 교차 배열에 의한 미세먼지제거장치 제작 및 미세먼지제거 실험 조건

제조된 활성탄 박판과 부도체가 교차 배열된 파일럿 플랜트 규모의 미세먼지제거장치를 제작하였으며, 부도체로써 50 cm × 50 cm 크기의 투명한 폴리카보네이트 판넬을 사용하였다. 미세먼지제거장치는 3개의 케이지(cage)를 병렬로 연결시켜서 설치하고, 각 cage에는 활성탄 박판전극 사이에 각각 부도체를 교대로 장착하였으며, cage 내에는 활성탄 박판전극 28매, 부도체 27매로 총 55매를 각각 1cm 간격으로 설치하였다. 활성탄 박판전극에는 악어클립 케이블을 이용하여 (+)전극과 (-)전극을 교대로 번갈아 연결시켜주었으며, 전류 공급은 교류를 직류로 변화시켜 공급하였다. 또한 전압의 인가를 위해 고전압 발생장치를 이용하여 활성탄 박판 전극에 특정 고전압을 발생시켰다.

장치내로의 미세먼지의 유입은 시설의 유입부에서 상용진공청소기를 이용하여 유입된 미세먼지가 9,000 ~ 12,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 유지되도록 미세먼지를 발생시켰으며, 후단에는 송풍기를 설치하여 흡입식으로 운전하였다.

개발된 집진장치의 집진효율을 평가하기 위해 인위적 미세먼지 발생장치, 미세먼지집진장치, 미세먼지 측정 장치로 구성된 미세먼지 제거율 측정 시스템을 구축하였다. 유입 미세먼지의 경우 (주)일본분체공업에서 제조한 JIS 시험용 표준먼지 1의 8종(JIS Tester Powders 1, class 8, JIS, Japan) PM5 (5 μm 크기 이하)를 사용하였으며, 밀도는 약 2.9-3.1 g/cm³, 주요 구성성분은 SiO₂ (34-40%), Fe₂O₃ (17-23%), Al₂O₃ (26-32%)이다. 본 연구 수행에 있어 전기집진장치의 스케일과 효율을 고려하였을 때 일반 분진발생기로 먼지를 발생시켰을 경우 고농도의 유입먼지농도 유입에 한계가 있어 상용진공 청소기를 개조하여 분진발생기를 대체하여 사용하였다. 상용진공청소기 자체의 흡입력으로 인해 흡입된 표준먼지가 상용진공청소기 내부에서 모터 회전을 통해 발생하는 사이클론에 의해 분산되도록 유도하였으며 유출부의 필터를 제거하여 분산된 먼지가 그대로 집진장치로 유입되도록 하였다. 진공청소기에 의해 발생되어 집진장치로 유입되는 먼지의 농도를 측정하기 위하여 분진측정계를 집진장치의 유입부에 설치하여 실시간으로 농도를 측정하였다. 다만 본 연구에서는 고농도와 저농도의 미세먼지 유입에 따른 유출 미세먼지 농도 및 제거효율을 관찰하고자 유입되는 미세먼지의 농도를 인위적으로 조절하지 않았지만 유입농도를 실시간으로 측정하여 유입농도의 정량성을 확보하고자 하였다. 유입 및 유출된 미세먼지의 측정은 광산란방식으로 반도체 레이저 광원을 이용하는 분진측정계(Digital Dust Monitor Model 3442, Kanomax, Japan)를 이용하였다. PM 10 (10 μm 크기 이하)의 입자를 측정하고 측정 단위는 count/min이며, 이에 대한 mg/m³으로의 환산지수(K factor)는 0.001이다. 환산지수를 토대로 결정되는 해

당 장치의 측정범위는 0.001~10 mg/m³이며 미세먼지의 농도는 매분 간 측정되는 단위시간당 PM 10 (10 µm 이하)의 미세먼지개수를 측정하였다. 또한 후단부에 송풍기를 설치하여 흡입식으로 운전하며 통과하는 유체의 선속도를 조절하였다. 제작된 미세먼지 집진 장치는 Fig. 1, 2와 같으며 자세한 장치사양은 Table 1과 같다.

실험수행은 송풍량을 5 m³/min에서 17 m³/min, 26 m³/min 까지 점점 증가시켰으며, 반응조에서의 선속도 및 공칭체

류시간은 각각 10 - 150 cm/sec, 15 - 0.9 sec 각각의 범위로 변화시켜서 수행하였다. 전류는 5 kV, 8 kV로 공급하였다. 모든 실험은 활성탄박판에 부착된 미세먼지에 대한 탈리과정 없이 선속도를 변화시키면서 순차적으로 수행하였다.

2.3. 미세먼지제거장치의 미세먼지 제거 경향 분석

미세먼지제거장치 내부에 있는 활성탄 박판 및 부전도체 박판의 위치에 따른 흡착미세먼지의 양을 측정하였으며,

Fig. 1. Schematic diagram of dust removal of electrostatic precipitator equipped with alternation of activated carbon coated electrodes and dielectric panels in pilot plant.

Fig. 2. Pictures of electrode cage equipped with activated carbon coated electrodes and dielectric panels by turns (left) and Chamber of electrostatic precipitator coupled with 3 cages in series (right).

Table 1. The experimental condition and dimension of electrostatic precipitator

Equipments and facilities	Dimension	Remarks
Production of influent dust	• JIS standard sizes : 1 µm - 10 µm	• Artificial dust made in Japan
Dust dispersion system	• Volume : 1.5 L	• Commercial vacuum cleaner
Dust suction blower	• Influent flow : 5-26 m ³ /min	• Suction type blower controlled by variation of direct current
Dust removal chamber	• Chamber : 3 cages • Dimension of cage : 60 cm x 60 cm x 60 cm - The number of plates in one cage • Activated carbon (50 cm x 50 cm) : 28 each • Dielectric panel (polycarbonate 50cm x 50cm) : 27 each	• Gap between activated carbon and dielectric panel : 1 cm
Direct current supply	• Maximum current : 20 KV	- High Voltage Supply, AU-30910-L (220 V), Matsusada precision Inc., Japan
Dust concentration analyser	- LASER scattering particle size analyser - Effective measurement range : less than PM10	- Digital Dust Monitor 3442, Kanomax, Japan

Fig. 3. Pictures of attached dust separation process of used activated carbon coated electrode.

장치를 분해하여 활성탄 박판 및 부전도체 박판 표면에 부착되어있는 미세먼지를 증류수를 이용하여 세척하였다(Fig. 3). 이후, 세척수에 포함된 미세먼지의 질량을 측정하기 위해 100℃에서 48시간 동안 건조하여 증류수를 완전히 증발시킨 후 남아있는 미세먼지의 질량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성탄 박판 전극의 특성 평가

3.1.1. 활성탄 박판의 비표면적 및 공극특성

활성탄 박판의 측정은 국내의 D사에서 제공된 분말 활성탄을 전처리하여(200℃, 진공) 활성탄 박판을 제조한 후, 주사전자현미경(S-4800, Hitachi, Japan)을 이용하여 비표면적(BET), 공극부피, 기공크기를 측정하였다. Table 2는 활성탄 박판으로부터 활성탄을 분리시켜 분말로 제조하여 원료활성탄과 비교한 것이다. 비표면적의 경우, 박판에 부착된 활성탄은 831 m²/g으로 원료활성탄의 약 80% 수준이었으며, 이는 기공이 없는 바인더제인 PVAc가 포함되어 산출되었기 때문인 것으로 사료된다. 또한 공극부피와 기공크기도 감소하였는데, 이는 바인더제 사용 시 매크로(macro) 크기의 기공은

폐색되고 마이크로(micro) 크기의 기공은 유지되었다는 것을 의미한다. 일반적인 전극표면 활성탄 코팅기술은 전기흡착식 해수담수화의 전기이중층 커패시터(Electric Double Layer Capacitor, EDLC) 제조에 주로 사용되며 코팅방법은 바인더제로서 폴리테트라플루오로에틸렌(Polytetrafluoroethylene, PTFE) 또는 폴리비닐리덴(Polyvinylidene fluoride, PVDF)을 사용하고 용매제로서 아세톤 등을 사용하여 활성탄과 혼합한다. 이때 활성탄 기공의 폐색 방지를 위한 개공제로서 나이트로메테인트리스프로판올(Nitromethanetrispropanol, NMP)을 추가적으로 첨가한다.^{12,13)} 반면에 본 연구에서는 추가적인 개공제 투입없이 PVAc 바인더제를 넣었음에도 마이크로 기공이 폐색되지 않고 유지되는데, 이는 PVAc를 녹이기 위한 용매제로 사용된 메탄올이 친수성이어서 소수성을 띠는 활성탄의 세공 내부로 유입되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 또한 세공 내부로 유입된 미량의 PVAc/메탄올 혼합물도 낮은 메탄올의 끓는점(약 60℃)으로 인해 120℃의 열 건조과정에서 모두 휘발되어 제거되기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4는 시판용 원료활성탄 및 활성탄 박판을 전자현미경으로 관찰한 것이다. 박판 활성탄의 경우에는 활성탄 표면의 일부에 바인더제가 부착되어 있음을 확인할 수 있었으며, 세공의 경우는 거의 대부분 회복되었음을 보여주고 있다.

3.1.2. 활성탄 박판의 장기 부식성 검증

Fig. 5는 알루미늄 판과 스테인레스 스틸 판에 각각 활성탄을 코팅시킨 박판을 수중에 담지시킨 후 일주일 경과후의 박판 표면을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 이때 알루미늄 판은 사전에 부식시키지 않은 박판, 대기중에서 미리 부식시킨 박판, 염산으로 산처리 한 박판에 각각 활성탄을 코팅하여 전극을 제조하였다. 알루미늄 원판과 표면을 산처리 한

Table 2. Pore properties of raw powdered activated carbon (A/C) and coated A/C on the electrode

Samples	Specific surface area (m ² /g, BET)	Total pore volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)
Raw powdered A/C	1038.96	0.5779	2.5
Coated A/C	831.00	0.46	2.2

Fig. 4. SEM images of raw powdered activated carbon (a) and coated activated carbon on the plates (b).

Fig. 5. Corrosion of activated carbon electrodes : (a) activated carbon coated on aluminium raw plate, (b) activated carbon coated on aluminium plate treated with acidic solution, (c) activated carbon coated on aluminium plate corroded in water, (d) activated carbon coated on stainless steel electrode

알루미늄 원판에 활성탄을 코팅한 전극의 경우 일주일 경과 후 전면에 걸쳐서 표면 부식이 진행됨을 육안으로도 확인이 가능하였다. 반면 수중에서 미리 부식시킨 알루미늄 판에 활성탄을 코팅한 경우는 상대적으로 부식 진행 속도가 느렸으며, 스테인레스 스틸에 활성탄을 코팅한 박판은 일주일 후에도 전혀 부식이 진행되지 않았다. 특히 스테인레스 스틸의 경우는 이후에도 수중 잠입과 건조를 수십 회 반복하여도 부식은 진행되지 않았다. 일반적으로 알루미늄의 부식방지를 위하여 BCl_3 또는 SnCl_2 등을 이용하여 Al_2O_3 를 AlCl_3 또는 AlCl_2 로 환원시켜 더 이상의 부식을 방지하여왔으나,¹⁴⁾ 본 연구의 경우 짧은 기간의 단순 표면부식 후 활성탄으로 코팅하였음에도 불구하고 활성탄 박판의 부식이 진행된 이유는 활성탄 코팅 이후에도 활성탄이 열린 기공구조를 유지하여 미세기공으로 물이 쉽게 침투되기 때문인 것으로 판단된다. 이에 활성탄 박판의 부식성 검증 연구를 통해 활성탄 박판전극의 재료로는 알루미늄보다 스테인레스 스틸판이 더 적합한 소재라 판단되었다.

3.2. 선속도 및 공칭체류시간 변화에 따른 집진효율 변화

활성탄 박판전극을 제조한 후, 부도체와 함께 cage에 전극을 교차 배열하여 미세먼지 제거능력을 선속도 및 공칭체류시간 별로 수행하여 측정하였다(Fig. 6). 미세먼지의 저감효율은 다음과 같은 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_o}{C_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

η : 제거효율(%)

C_o : 유입부 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_i : 유출부 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

선속도 변화에 따른 미세먼지의 제거효율 경향을 보면 유입 미세먼지의 농도 편차가 큼에도 불구하고 유출미세먼지의 농도가 안정적으로 유지됨을 알 수 있었으며 동시에 제거율 역시 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는 개발된 전기집진장치가 안정적으로 대기 중 미세먼지를 제거할 수 있음을 의미한다. 실험진행은 유입미세먼지를 인가 전압을 5 kV로 공급하며 선속도를 10 cm/sec(공칭체류시간

: 15초) 유지하여 수행한 경우, 처리효율은 약 98%를 보였으며, 선속도 25 cm/sec(공칭체류시간: 8초)까지 제거효율이 유지되었다. 하지만 30 cm/sec(공칭체류시간: 5초)에서는 약 95%의 제거효율로 다소 낮아져 전류공급을 8 kV로 승압시켰으며, 그 결과 제거효율은 다시 97%로 회복되었다. 그 이후 전류공급을 8 kV로 유지하고 선속도를 35 cm/sec(공칭체류시간: 4초), 90 cm/sec(공칭체류시간: 1.5초)로 증가시켜 매우 짧은 체류시간에서도 미세먼지제거효율은 95% 이상을 유지하였다. 특히, 전류공급을 10 kV로 승압 시에는 공기 중의 수분이 전도체가 되어 누전이 현상이 발생되어 본 활성탄박판 전극을 이용한 미세먼지제거시설에서 적정 공급량은 5-8 kV임을 확인할 수 있었다. 한편, 일반 대기 중 미세먼지 입자의 제거효율을 확인하기 위해 전류공급은 8 kV로, 송풍선속도를 90 cm/sec(공칭체류시간: 1.5초)로 유지한 상태에서 미세먼지를 공급하지 않은 통상의 공기 중 미세먼지농도 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그대로를 전극을 통과시킨 결과, 처리공기는 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 저하되는 것을 확인하였고, 본 연구의 미세먼지공정은 저농도에서도 매우 유효함을 알 수 있었다. 선속도를 142 cm/sec(공칭체류시간: 0.9초)로 유지하고 PM5 크기의 유입미세먼지농도를 약 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유입하였을 경우 미세먼지제거효율은 약 93% 이상, 유출농도는 50~70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위였다. 종합해보면 개발된 전기집진장치는 높은 선속도와 짧은 체류시간에서도 안정적인 미세먼지제거효율을 보였으며, 유입미세먼지농도가 낮을 경우에도 높은 미세먼지제거효율을 보임을 확인할 수 있었다. 일반적인 전기집진장치는 유입되는 먼지를 방전시켜 음전하를 띠게 하여 전기집진장치 내부의 전극 중 음전극은 집진하여 양전극에서만 먼지를 포집하는 방법으로 운전한다. 이때 운전선속도는 약 1-2 m/sec로 매우 빠르게 유지하며 초미세먼지까지도 제거가 95% 이상으로 가능하다.¹⁵⁾ 반면 본 연구를 통해 제작된 활성탄 박판 집진장치의 경우 방전공정 없이도 높은 집진 효율을 유지하는데 이는 다공성인 활성탄을 전극표면에 코팅함으로써 전류밀도가 전극판 전체에 고르게 분포되어 한곳에 쌓이지 않고 박막으로 부착되기 때문이며, 또한 전극판 사이에 삽입한 부도체가 일종의 유전체로 작용하여 정전기 표면을 증가시켰을 뿐만 아니라, 정전유도체에 의해 기존 전기집진장치의 문제점인 역전리 현상의 문제를 해결하였기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6. Dust concentration of influent and effluent, and dust removal efficiencies with time variation ((a); linear velocity : 10 cm/s, current : 5 kV, (b); linear velocity : 20 cm/s, current : 5 kV, (c); linear velocity : 25 cm/s, current : 5 kV, (d); linear velocity : 30 cm/s, current : 8 kV, (e); linear velocity : 35 cm/s, current : 8 kV, (f), (g); linear velocity : 90 cm/s, current : 8 kV, and (h); linear velocity : 142 cm/s, current : 8 kV.

Table 3은 각 실험 조건에 변화(전압, 선속도)에 따른 미세먼지 농도 제거효율을 요약하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 전극의 간격은 공기가 유전체가 되어 방전이 일어나지 않는 최소 거리인 1 cm로 설정하여 전극의 전체 표면적은 일정하게 유지하였다. 인가전압 변화에 따른 먼지 제거효율을 확인해 보면 동일 선속도(30 cm/s)조건에서 인가전압이 5 kV일 때와 8 kV일 때 먼지 제거효율이 94%에서 96%로 향상됨을 확인하였으며 이는 인가전압이 증가함에 따라 활성탄 코팅 박판 표면에 존재하는 전류밀도 또한 증가하게 되어 박판의 먼지 흡착능이 향상되었다고 판단된다. 또한 동일 인가전압시 유입 공기의 선속도가 증가할수록 미세먼지 집진성능이 미세하게 감소됨을 확인할 수 있으며 이는 미세먼지의 박판내 체류시간이 짧아져서 미처 박판에 흡착

되지 않고 빠져나가는 미세먼지의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 일반적인 전기집진장치의 집진성능 즉 제거

Table 3. Average dust removal efficiency for each experimental condition

Condition		Average dust removal efficiency (%)
Current (kV)	Linear velocity (cm/s)	
5	20	97.7±0.4
	25	97.2±0.2
	30	94.2±1.3
8	30	96.0±0.8
	35	96.2±0.8
	90	94.5±1.1
	142	92.9±2.0

효율은 집진전극의 표면적과 전극으로의 입자이동속도에 비례하는데 본 연구결과의 경우 20 cm/sec의 선속도에서 98%의 제거효율을 나타내었으며 선속도를 7배까지 점차 증가시켜 142 cm/sec로 수행하였을 경우에도 92%의 집진 효율을 보여 선속도를 크게 증가시켜도 제거효율에는 큰 차이가 없음을 보인다. 이는 본 연구를 통해 개발된 집진장치에서 먼지가 전극에 부착되는 속도가 142 cm/sec 이상으로 높은 선속도에서도 안정적인 집진 성능이 유지됨을 의미한다.

일반적으로 전기집진장치의 경우 타 집진기술에 비해 제거효율이 높다고 알려져 있어 본 기술 역시 기존의 전기집진장치와 제거효율 측면에서의 기술적 우위점은 작다. 다만 기존 전기집진장치의 대표적인 한계점인 경제성 측면에서 많은 우위점을 갖는다. 기존의 전기집진장치의 경우 코로나 방전을 위해 최소 20 kV 이상의 고전압을 인가해야 하는 반면 활성탄 박판 삽입 전기집진장치의 경우 8 kV의 전압만으로 높은 제거효율을 보여 운전 단가가 저렴하다.¹⁶⁾ 또한 전극판만 삽입되어 있는 기존 전기집진장치에서 발생 가능한 역전리 현상에 의한 먼지 탈리가 방지되어 장기간 운

전에도 높은 효율의 유지가 가능하다는 것이 본 연구를 통해 개발된 장치의 기술적 장점이라 할 수 있다.¹⁷⁾

3.3. 미세먼지제거장치의 미세먼지 제거 경향 분석

미세먼지제거 장치의 먼지 제거 경향 분석을 위해 1개 Cage를 기준으로 5등분하여 좌, 좌중, 중, 우중, 우측(a, b, c, d, e, Fig. 1)의 활성탄 박판과 부도체 박판을 각각 1쌍씩 해체하여 부착되어있는 미세먼지의 질량을 측정하였으며, Fig. 7은 미세먼지제거 장치 분해 직후 활성탄 박판 및 부도체에 미세먼지가 부착된 모습이다. 첫 단에 삽입된 박판에 가장 미세먼지가 많이 부착되어있음을 육안으로도 확인할 수 있었으며 후단으로 갈수록 부착되어있는 미세먼지양이 확연히 감소함을 확인하였다. Fig. 8은 이를 정리하여 나타낸 것으로써 본 연구에서 먼지부착은 플러그 플로우(plug flow)타입으로 진행되었음을 알 수 있었으며, 먼지의 부착량에 있어서 부도체나 활성탄전극 모두에서 유사 값을 나타내어 전극 사이에 설치한 부도체가 정전기 유도체로서의 기능이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7. Pictures of dust attached activated carbon electrodes (A) and dielectric panels (B) in dust collecting chamber arranged in order of cage 1, 2 and 3.

Fig. 8. Mass of collected dust on the activated carbon electrodes (left) and dielectric panels (right) of cage 1, cage 2 and cage 3 in series.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 활성탄이 코팅된 박판전극과 부도체인 정전유전체와 교차 배열된 전기집진 장치를 이용하여 미세먼지 집진성능에 대하여 알아보았다. 활성탄 코팅전극으로는 알루미늄보다는 부식이 일어나지 않는 스테인레스 스틸 재질이 적합하였으며, 코팅된 활성탄의 비표면적은 $831 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 분말활성탄 대비 약 80% 수준의 비표면적을 보였고, 코팅 후에도 활성탄의 기공이 유지되었다. 또한 개발된 전기집진 장치는 선속도가 90 cm/s 이고 공칭체류시간 1.5초인 조건에서도 약 95%의 미세먼지 제거효율을 나타내었다. 또한 직렬구조의 먼지제거시설에서 먼지의 부착은 plug flow로 진행되었으며 활성탄 전극과 정전유전체로 이용한 부도체가 유사한 먼지 부착량을 보여주었다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 환경산업기술원 환경산업선진화기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

KSEE

References

- Kim, K., Park, J., Jun, T. and Kim, I., "Preparation of Electrode Coated with Activated Carbon for Dust Removal," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(11), 815~820(2013).
- Bakke, B., Stewart, P., Ulvestad, B. and Eduard, W., "Dust and Gas Exposure in Tunnel Construction Work," *Am. Ind. Hygiene Assoc.*, **32**(4), 457~465(2001).
- Lee, J., Moon, J. and Han, C., "A Study on Development of Oval Type High Efficient EGR Cooler," *Trans. Korean Soc. Automotive Eng.*, **19**(1), 89~94(2011).
- Bae, S., Oh, T., Yoon, Y., Han, K., Jang, H., Choi, S. and Park, C., "A research of the platform ventilation system improvement method," *J. Spring Confer. Korean Soc. Railway*, **5**, 985~989(2016).
- Wang, Y., Gui, K., Shi, M. and Li, C., "Removal of dust from flue gas in magnetically stabilized fluidized bed," *Particuology*, **6**(2), 116~119(2008).
- Kim, K., Park, H., Jun, T., Lee, J. and Nam, S., "Removal of Dust in Positive and Negative Plates of Electrode Coated with Activated Carbon," *J. Korean Soc. Atmospheric Environ.*, **29**(6), 830~837(2013).
- Chai, M., Lu, M., Keener, T., Khang, S. J., Chaiwatpongakorn, C. and Tisch, J., "Using an improved electrostatic precipitator for poultry dust removal," *J. Electrostatics*, **67**(6), 870~875(2009).
- Ni, M., Wang, X., Xiao, G., Qju, K., Yang, G., Gao, X. and Cen, K., "Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures," *Powder Technol.*, **286**, 789~797(2015).
- Park, S., Choi, S., Park, G., Kim, J., Bong, C., Park, S., Kim, J. and Hwang, U., "Collection Characteristics of Particulate Matters from Biomass Burning by Control Devices: Mainly Commercial Meat Cooking," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **27**(6), 641~649(2011).
- Kim, K. and Park, J., "Soundproofing Plate with Thin Activated Carbon Film for Removal of Road Pollutants," Research report, KICT(2010).
- Kim, K., Park, J., Lee, J., Jun, T. and Kim, I., "Simultaneous Removal of Gas and Dust by Activated Carbon Coated Electrode," *Environ. Eng. Res.*, **18**(4), 229~234(2013).
- Yang, C., Kim, H., Cho, W., Cho, B., Yun, K. and Rim, B., "Electrochemical Characteristics of EDLC Fabricated by Different Preparation Processes of Activated Carbon Electrode," *J. Korean Electrochem. Soc.*, **4**(3), 98~103(2001).
- Obreja, V., "On the performance of supercapacitors with electrodes based on carbon nanotube and carbon activated material-A review," *Phys. E*, **40**, 2596~2605(2007).
- Nabeel, A. J., Jan, G. van O. and Leon, L., "Mechanistic aspects of the formation of carbon-nanofibers on the surface of Ni foam : A new microstructured catalyst support," *J. Catal.*, **239**, 460~469(2006).
- Chai, M., Lu, M., Keener, T., Khang, S., Chaiwatpongakorn, C. and Tisch, J., "Using an improved electrostatic precipitator for poultry dust removal," *J. Electrostatics*, **67**, 870~875(2009).
- Kim, H., Kim, J. and Kim, J., "Evaluation of Particle Collection Efficiency in a Wet Electrostatic Precipitator Using an Electrosprayed Discharge Electrode," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**, 530~537(2015).
- Ahn, K., Kim, B. and Lee, K., "The Improvement of Collection Efficiency of Electrostatic Precipitator," *J. Korean of Safety*, **17**, 25~30(2002).