Particle and Aerosol Research 제 6 권 제 4 호
PAAR Vol. 6, No. 4 (2010) pp. 173-183
(사)한국입자에어로졸학회

융합형여과집진장치에서의 먼지입자와 원소수은의 제거 성능 특성

박영옥*・정주영
한국에너지기술연구원 청정화석연료연구센터
(2010년 10월 6일 투고; 2010년 10월 20일 수정; 2010년 11월 3일 게재확정)

Simultaneous Removal Characteristics of Particulate and Elemental Mercury in Convergence Particulate Collector

Young Ok Park*・Ju Yeong Jeong
Clean Fossil Fuel Research Center, Korea Institute of Energy Research
(Received 6 October 2010; received in revised form 20 October 2010; accepted 3 November 2010)
(2010년 10월 6일 투고; 2010년 10월 20일 수정; 2010년 11월 3일 게재확정)

Abstract

The high temperature pleated filter bags which were used during this study were made of pleated nonwoven fabric of heat and acid resistant polysulfonate fibers which can withstand the heat up to 300 ℃ and have a filtration area which is 3 to 5 times larger than the conventional round filter bags.

Cartridge module packed with 3 kind of the sulfur impregnated activated-carbon based sorbents were inserted in the inner of the pleated filter bag. This type of pleated filter bag was designed to remove not only the particulate matter but also the gaseous elemental mercury. The electrostatic precipitator part can enhance the particulate removal efficiency and reduce the pressure drop of the pleated filter bag by agglomerated particles to form a more porous dust layer on the surface of the pleated bag which is increased the filter bag cleaning efficiency. In addition, the most of particles are separated from the flue gas stream through the cyclone and the electrostatic precipitator part which were installed at the lower part and main body part of the convergence particulate collector, respectively. Thus reduce particulate loading of the high temperature pleated filter bags were applied in this study to analyze the removal characteristics of particulate matter and gaseous elemental mercury.

Keywords : Activated carbon, Pleated filter bag, Convergence particulate collector, Elemental mercury, Polysulfonate fiber, Particulate loading, Filter bag cleaning efficiency

* Corresponding author.
Tel : +82-42-860-3625, Email : yopark@kier.re.kr

1. 서 론

석탄화력발전소와 폐기물소각로 등의 산업체에서 배출되는 대기오염물질 중에는 중금속물질인 수은은 배출되는 환경적으로 매우 중요한 오염물질로서 다른 미세오염물질과는 달리 휘발성이 매우 높기 때문에 소각 배가스 중에 거의 vapor상으로 원소수은(Hg^0)이나 $HgCl_2$, HgO, HgS, $HgSO_4$와 같은 산화수은 형태로 배출되는 특성을 갖는다(Roberts, et. al., 1998; Korpiel and Vidic, 1997). 수은은 세계적으로 큰 관심의 대상이 되고 있으며, 선진국에서는 수은의 배출을 엄격히 규제하고 있다. 중금속물질인 수은은 증기압이 특히 높아서 가스상으로 배출될 가능성이 크며 수은은 그 독성 때문에 오랜 기간동안 많은 주목을 받아온 물질로서 발암물질, 돌연변이 유발 물질, 기형 유발 물질로, 고농도의 수은에 노출되면 폐질환과 신장질환이 발생할 가능성이 있다. 수은이 생태계에 영향을 미친 몇몇 주목할 만한 오염 사례 중의 하나는 1953-1956년의 일본 미나마타 지역에서 일어난 수은 중독 사건으로, 이는 매우 잘 알려져 있다. 수은의 환원에는 용매 추출, 이온 변환, 막 분리 등의 다양한 물리화학적 방법이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 대부분의 방법들은 많은 에너지 혹은 대량의 화학물질을 필요로 한다. 반면, 흡착은 폐수의 수은을 제거하는 효과적인 방법 중의 하나이며, 이 중 활성탄 흡착은 매우 효율적이다. 그러나 큰 규모의 적용에는 단가가 비싼 단점이 있다(박영옥 등 2004; 최호경 등 2007). 가스상 수은은 크게 원소수은과 산화수은의 형태로 대기 중에 배출되며 산화수은은 물에 대한 용해도가 크기 때문에 석탄화력발전소나 대형 폐기물소각로에 설치되어 운전 중인 습식 탈황장치로 제거가 가능하지만 원소수은은 물에 대한 용해도가 낮아 기존 설비에서 제거되지 않는다(최호경, 2008).

수은 제거를 위해서는 대부분의 산업체에서는 세정식집진장치, 전기집진장치 또는 여과집진장치 등의 방법을 사용하여 왔으나, 이러한 대부분의 방법들은 특정형태의 수은에 대해서만 효율적인 제거방법으로 알려져 있으며, 예를 들어 수용성인 산화수은의 제거는 습식세정식집진장치가 매우 효율적인 방법으로 알려졌다(Olson et.al., 2000; 박영옥 등 2008). 이밖에도 활성탄과 같은 흡착제를 사용하여 수은을 제거하기도 하는데, $HgCl_2$는 비첨착활성탄을 사용하여 단순한 물리흡착현상에 의해서도 충분히 제거가 되지만 원자수은의 경우 주로 화학흡착현상을 통해 제거가 되므로 황이 첨착된 첨착활성탄을 사용하여 제거한다. 특히 원소수은에 대한 연구가 그동안 많이 진행되어 왔으며, 서로 다른 여러종류의 흡착제를 사용하여 흡착성능을 측정하였는데 일반적으로 흡착층에서의 온도가 낮을수록 흡착성능이 높게 나타난 것으로 보고하였다(Karatza, et. al., 2000; Krishnan, et. al., 1994). 특히 Krishnan 등은 원소수은이 흡착제에 의한 흡착현상이 낮은 운전온도 영역에서는 물리흡착이 우세하게 나타나고, 높은 온도영역에서는 화학흡착이 보다 더 우세하게 나타난다고 해석하였다. 또한 다른 연구자들의 실험결과에 의하면 두 종류의 활성탄을 사용하여 원소수은의 흡착실험 결과에 의하면 활성탄의 비표면적이 넓고 온도가 낮을수록 원소수은의 흡착이 잘 이루어진다고 밝혔으며, 산성가스 존재 여부에 따라 흡착이 보다 더 잘이루어 진다고 보고하였다(Brown, et. al., 1999). 이밖에도 연소배가스 중에 함유된 원소수은 제거용 황첨착 활성탄의 제조에서 최적의 황함유량(S)과 탄소(C)의 혼합비율을 결정하기 위해서는 황과 탄소의 당량비(sulfur to carbon molar ratio)와 활성화 온도의 변수를 토대로 최적의 조건의 조성비율을 도출하기 위한 연구를 수행 한 결과에 의하면 활성화 온도가 높을수록 황이 탄소표면에 강한 결합이 일어나고 좀 더 우수한 흡착결과를 얻을 수 있었다고 보고하였다(Liu, et. al., 1998).

연소배가스 중에 함유된 먼지입자 및 원소수은을 동시에 제거하고 먼지입자의 제거성능을 배가 시키고 미세 먼지입자의 포집효율을 향상시키며 장치의 압력손실을 낮게 유지하며 집진필터의 수명을 연장시키기 위해 원심집진기능, 여과집진기능과 전기집진기능을 접목한 융합형 여과집진장치를 개발하였다(박영옥 등 2008). 수은과 같은 중금속물질을 제거하고 활성탄의 재생이 용이한 구조의 입상 황참착 활성탄을 충전하는 카트리지를 고온용 주름필터백 내부에 장착하였다. 따라서 본 연구에서는 입상 활성탄이 충진된 카트리지를 장착한 고온용 주름필터백을 융합형 여과집진장치에 설치하여 먼지입자와 원소수은의 제거 특성을 운전조건 변화에 따라 고찰하였다.

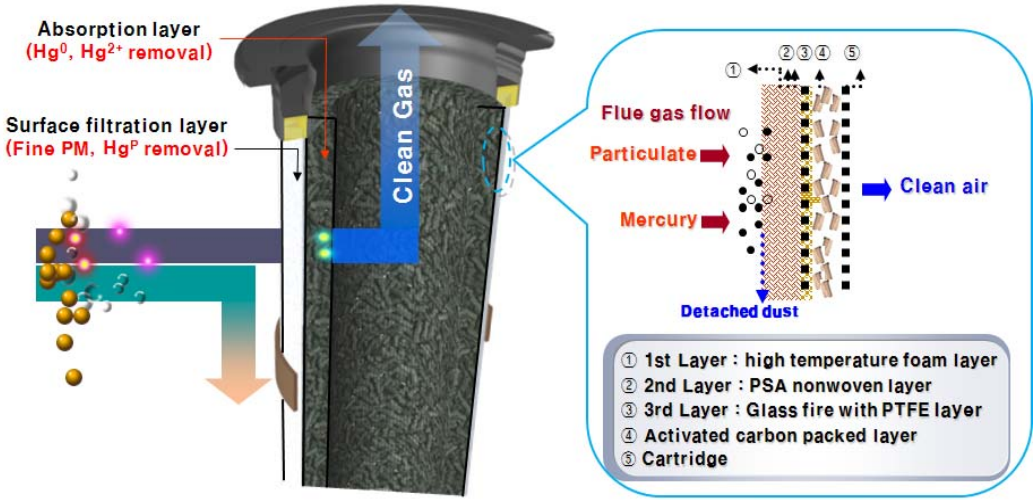


Figure 1. Activate carbon packed cartridge and high temperature pleated filter bag for simultaneous removal of particulate and elemental mercury.

2. 실험장치 및 방법

2.1 활성탄 충진 카트리지 주름 필터

활성탄을 충진한 카트리지를 장착한 고온용 주름필터와 활성탄 충진 카트리지 장착 주름필터에서 먼지입자와 원소수은을 제거하는 원리를 Figure 1에 나타냈다. 활성탄충진 카트리 장착 고온용 주름필터의 첫 번째층은 고온용 다공성 거품층, 2번째층은 polysulfoneamine(PSA) 부직포층, 3번째층은 유리섬유 기포에 층과 테프론 섬유 복합층, 활성탄 충진층과 카트리지로 구성되어 있다. 연소 배가스 중에 함유된 먼지입자는 필터의 표면에서 제거되며, 수은과 같은 가스상 오염물질은 주름필터 내부에 장착된 활성탄 충진 카트리지에 의해 제거되고 청정가스만 외부로 배출된다.

2.2 융합형 여과집진장치

Figure 2에 융합형 여과집진장치의 개념도를 나타내었다. 장치의 구조는 장치 하부의 원심분리부, 상부의 전기집진부 및 여과집진부의 3개 부분이 일체형으로 구성되어 있다. 장치 하부의 원심분리는 장치로 유입되는 먼지입자를 선회류에 의해 1차로 분리시키며 원심분리부를 통과한 입자상 오염물질은 전기집진부로 유입되는데, 하전 영역에 유입된 입자는 코로나 방전에 의해 전기적으로 하전되어 정전기를 띄게 되고 정전기적 인력과 가스의 흐름에 의해 집진극 쪽으로 이동하여 포집된다. 집진극에 포집되지 않은 먼지입자는 집진필터에 도달하여 마지막으로 포집되고 집진필터를 통과한 청정 가스는 융합형 여과집진장치의 외부로 배출된다. 실험용으로 제작된 본 장치의 용량은 250Nm^3/hr이며 지름 156 mm, 길이 1,000 mm 규격의 주름필터 2본이 융합형 여과집진장치의 내부에 장착되어 있다. 주름필터의 탈진장치는 충격기류 탈진방식이며, 탈진시 유입되는 유량을 극대화시키기 위해 코안다 효과를

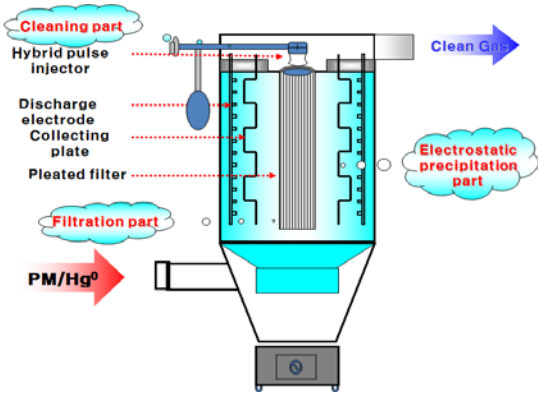


Figure 2. Structure of convergence particulate collector.

이용하는 하이브리드 펄스 인젝터(Model , (주)안성정기)를 설치하였다. 집진필터 주위에는 6개의 방전극과 2열의 집진극이 설치되어 있으며, 방전극과 집진극에 부착된 먼지입자층을 털어내기 위한 햄머형 래퍼로서 무거운 추의 자연 낙하를 이용하는 추타장치가 설치되어 있다. 장치의 외벽에는 전열장치 및 보온재를 부착하여 실험 중 온도변화가 없도록 하였다.

2.3 실험 방법

융합형 여과집진 실험장치의 공정도를 Figure 3에 나타내었다. 융합형 여과집진장치는 처리기체 내에 먼지를 공급하는 먼지공급 및 분산부분, 수은공급 및 분산부분, 실험 조건별 여과성능 및 탈진성능을 실험하기 위한 장치 본체부분, 집진장치 배출 및 유량조절을 위한 처리기체 흡인부분, 온도의 유지를 위한 전기 히터 부분, 집진장치의 유해대기물질 후처리 흡착부분, 시료 채취구 등으로 구성되어 있다. 시료채취구는 실험장치의 입구와 출구에 설치되어 있으며, 시료채취 과정에서 분석기 내부 오염의 방지와 수분을 제거하고 기타 측정에 방해가 되는 오염물질의 제거를 위해 시료가스의 전처리 장치를 설치하였으며, Figure 4에 시료가스 전처리장치의 구성도를 나타내었다. 흡인 시료가스의 전처리장치는 필터, 임핀저, 응축 트랩, 냉각기 등으로 구성되어 있고, 필터는 미세 먼지입자가 가스분석기 내부로 유입되는 것을 방지하고, 임핀저에서는 10%(w/w)의 Na_2CO_3 수용액을 통과시켜 가스상 원소수은의 측정을 방해하는 황과 같은 성분을 흡수시켜 제거하며, 응축 트랩에서는 수분을 응축시켜 제거한다.

가스상 원소수은의 측정에는 수은분석기(VM-3000, Mercury Instruments)를 사용하였다. 이 분석기의 원소수은 검출 방법은 CVAAS(Cold Vapor Atomic Absorption Spectroscopy) 법을 사용하였으며, 수은의 화학종 중 원소수은만 측정하며, 반응속도가 빠르고 연속적인 측정이 가능하다. 원소수은의 측정 농도의 범위는 0.1～2,000㎍/㎥, 측정 해상도는 0.1㎍/㎥이다. 미세 먼지입자의 크기와 농도의 측정에는 입자분석기(Aerodynamic Particle Sizer 3321, TSI)를 사용하였으며, 먼지입자의 측정 범위는 0.5～20㎛이며, 0.02㎛의 해상도를 가진다. 융합형 여과집진 실험장치의 먼지입자와 원소수은 제거성능 실험은 활성탄이 충진된 카트리지가 장착된 주름필터를 설치한 조건에서 전기집진부를 운전하는 조건과 운전하지 않은 조건에서 수행하였다. 융합형 여과실험장치의 배가스 처리유량은 250㎥/hr이며 배가스의 온도는 130℃를 유지하였다. 실험조건은 유입배가스 중에 함유된 수은농도는 30㎍/㎥, 먼지입자의 농도는 20 g/㎥으로 일정하게 유지하였으며, 여과속도는 0.5～1.0m/min 범위로 변화시켰다. 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 융합형여과집진장치에서 먼지입자에 대한 집진효율(E_p)과 원소수은의 제거효율(E_{Hg})은 아래의 식을 이용하여 산출하였다.

$$E_p = (C_{indust} - C_{outdust})/C_{indust} \quad (1)$$

$$E_{Hg} = (C_{inHgo} - C_{outHgo})/C_{inHgo} \quad (2)$$

여기서 C_{indust}는 융합형여과집진장치에 유입되는 질

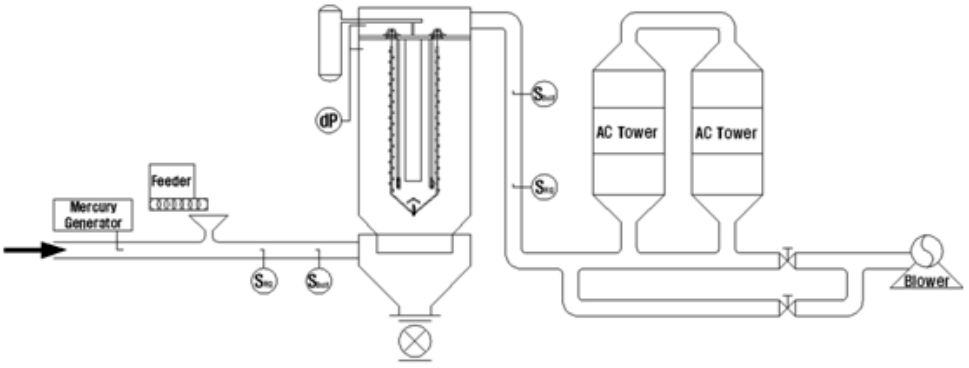


Figure 3. Schematic diagram of test unit.

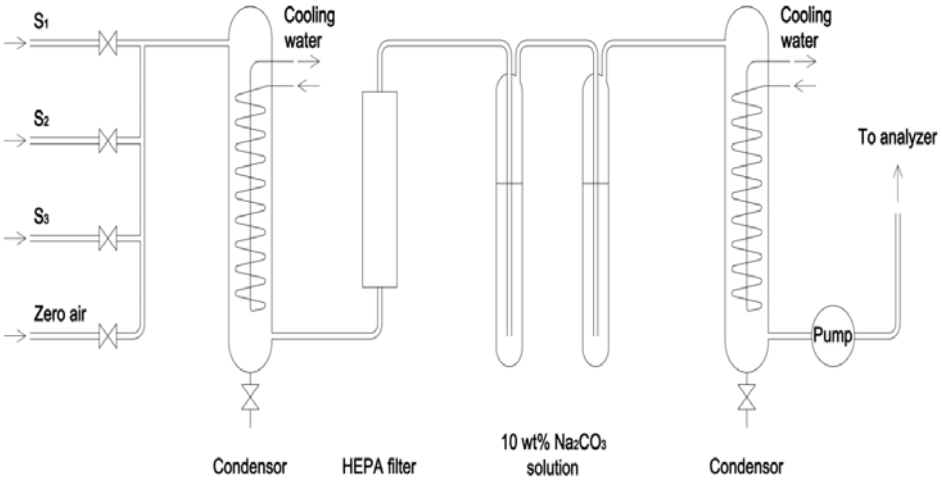


Figure 4. Flow schematic of the sampling gas treatment.

량농도이고, $C_{outdust}$는 융합형여과집진장치에서 유출되는 질량농도이며, C_{inHgo}는 융합형여과집진장치에 유입되는 원소수은의 수은의 질량농도이며, C_{outHgo}는 융합형여과집진장치에서 유출되는 원소수은의 질량농도이다(Hinds, 1999).

실험용 먼지로는 석탄화력 발전소의 전기집진장치에서 포집된 미분탄 연소 비산재(fly-ash)를 사용하였다. 실험에 사용된 입자의 밀도는 약 1.177 g/cm^{3}이고 중간입자크기(mass mean diameter)는 19.0 ㎛이며, 실험용 먼지의 입자크기 분포도를 Figure 5에 나타내었다.

Table 1. Experimental condition of particulate collection

Conditions	Value
Test filter	High temp. pleated filter bags with activated carbon mounting cartridges
Test dust	Fly-ash
Test activated carbon	Sulfur impregnated activate carbon(BR4, RBHG3 ; N사, HGR, C사) Activated carbon fiber(ACF, K사)
Test dust density, g/cc	1.177
Applied Voltage, kV	고전압 인가조건(ESP on) : 17.0 고전압 인가하지 않는 조건(ESP off) : 0
Filtration area, m^2	3.6
Filtration velocity(V), m/min	0.5～1.0
Inlet dust concentration(C_i), g/m^3	20.0
Inlet Hg concentration, μg/m^3	30
Operating temperature, ℃	130
Cleaning start pressure drop, mmH_2O	150
Cleaning air pressure(Pp), kg$_f$/cm^2	5.0
Pulse duration, msec	100

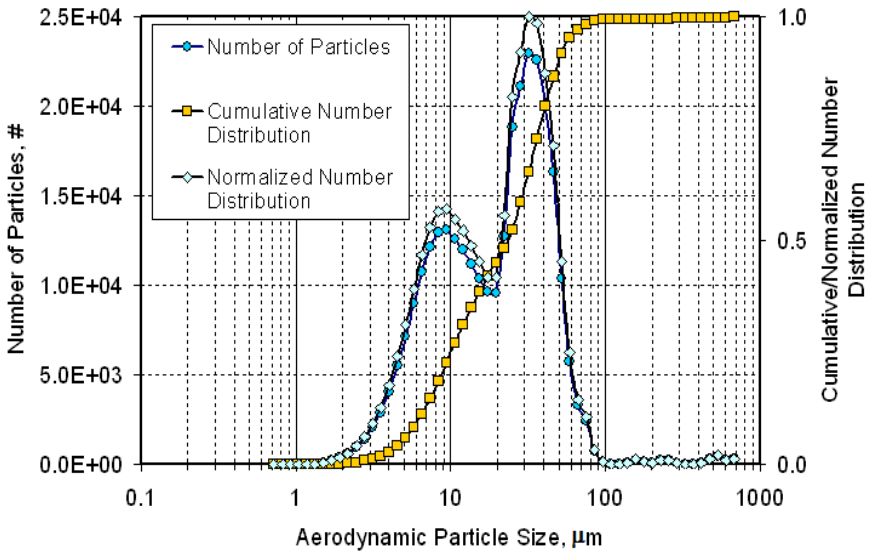
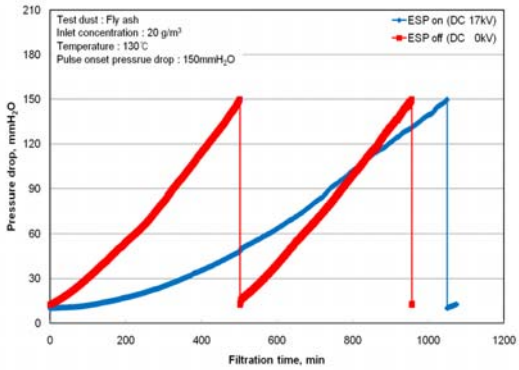


Figure 5. Particle size distribution of test dust.

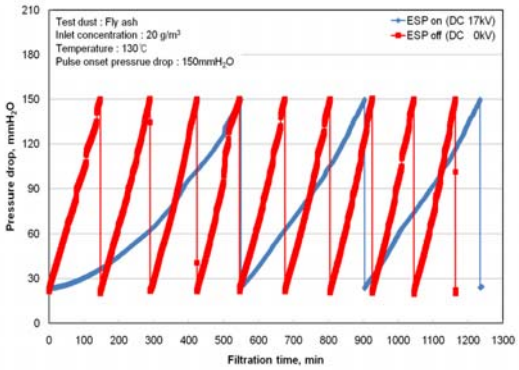
3. 결과 및 고찰

3.1 압력손실 변화 특성

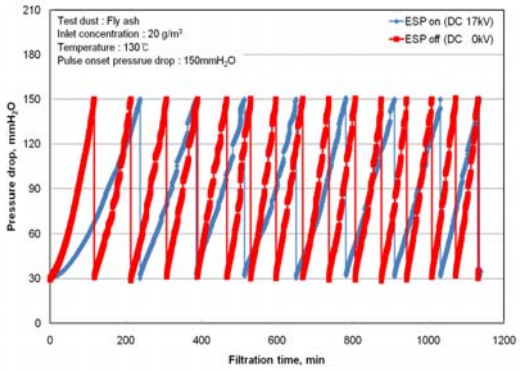
Figure 6에 첨착활성탄 카트리지 담지 주름필터를 장착한 상태에서 전기집진부에 고전압을 인가하지 않았을 조건(ESP off)과 인가한 조건(ESP on)의 집진필터의 압력손실 변화 특성을 나타냈다. 여과속도 0.5m/min 조건에서 고전압을 인가한 조건에서는 탈진간격이 약 1,000분을 유지하였으나, 고전압을 인가하지 않는 조건에서는 약 500분의 탈진간격을 유지하여 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 탈진간격이 약 2배 정도 길게 유지되는 것을 확인하였다. 또한, 여과속도 0.8m/min 조건에서는 고전압을 인가한 조건이 탈진간격이 약 400분 정도 유지하였으나 고전압을 인가하지 않은 조건에서는 약 130분 정도의 탈진간격을 유지하여 고전압을 인가하는 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 약 3배 길게 유지되는 것을 확인하였다. 여과속도 1.0m/min 조건에서도 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 탈진간격이 약 2배 정도 길어 졌으나, 탈진주기는 동일한 운전시간에서 여과속도 0.5 m/min 조건에 비해 약 7배 정도 짧아졌다. 따라서, 본 실험에서 확인 한 결과에 의하면 고전압을 인가하면 탈진간격은 고전압을 인가하지 않은 조건에 비해 약 2배 정도 길어 진다는 것을 확인하였고, 여과속도가 빨라지면 탈진간격도 급격히 감소한다는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상은 유입가스중에 함유된 먼지입자 중 큰입자 들은 cyclone 부분에서 먼저 제거된 후 나머지는 상부로 상승하여 전기집진부에 유입되어 고전압을 인가하게 되면 먼지입자들은 하전되어 집진극에 포집되고, 포집되지 않는 일부는 주름필터로 유입되어 포집된다. 이로 인해 주름필터 표면에 포집되는 먼지입자의 양은 극히 적어 먼지부하가 감소된다. 또한 주름필터 표면에 포집된 먼지입자는 정전기를 띄고 있어 입자들 끼리 서로 뭉치게 되어 먼지입자층의 공극율이 커지게 된다. 이로 인해 주름필터 표면에 포집된 먼지입자층을 통과하는 가스저항이 낮아 압력손실 낮으며, 운전시간의 경과에 따른 압력손실의 증가 기울기가 작아진다. 또한 여과속도가 빨라지는 조건일수록 인가전압의 인가와 관계없이 탈진횟수가 증가하는 것은 여과속도가 빠르면 먼지입자의 운동에너지지가 크기 때문에 먼지입자들이 집진극에 포집되는 양이 적어져 주름필터의 부가되는 먼지입자 부하가 커지고 또한 주름필터 표면에 형성된 먼지입자층의 저항과 필터의 메디아의 저항이 증가하게 되어 압력손실이 급격히 증가하는 현상이 발생하기 때문이다.



(a) Filtration velocity : 0.5 m/min



(b) Filtration velocity : 0.8 m/min



(c) Filtration velocity : 1.0 m/min

Figure 6. Variation of pressure drop with filtration time.

3.2 탈진간격

Figure 7에 고전압을 인가한 조건과 인가하지 않은 조건에서 융합형 여과집진장치의 탈진간격의 변화 경향을 여과속도의 변화에 따라 나타냈다. 실험결과에 의하면 탈진간격은 여과속도가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타냈고, 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 여과속도가 증가함에 따라 탈진간격의 감소가 급격한 경향을 나타냈다. 평균 탈진간격을 비교해 보면 여과속도가 0.5, 0.8, 1.0 m/min인 조건에서 고전압을 인가한 조건에서는 1,060분, 416분, 144분으로 각각 나타났고, 고전압을 인가하지 않는 조건에서는 459분, 130분, 76분으로 각각 나타나, 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 약 2배 정도 길어진 것으로 확인되었다. 따라서 탈진간격이 길어지면 탈진조작 횟수가 줄어들어 탈진용 압축공기의 소요량도 급격히 감소되고 탈진조작에 의한 주름필터에

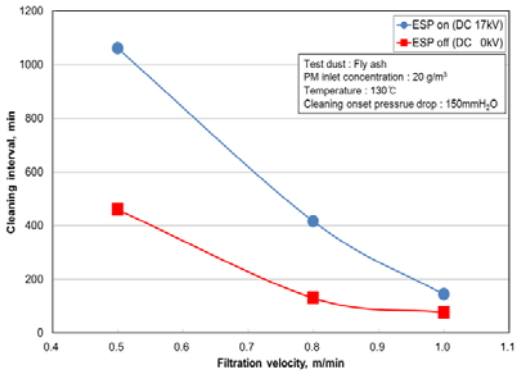


Figure 7. Filter bag cleaning interval as a function of filtration velocity.

부가되는 물리적인 충격의 횟수를 줄일 수 있어 주름필터의 마모파손을 방지하여 주기 때문에 주름필터의 수명 연장에 크게 기여하는 장점이 있다.

3.3 잔유압력손실

활성탄이 담지된 카트리지 장착 주름필터 표면에 부착된 먼지입자층을 탈진조작에 의해 털어낸 직후의 압력손실을 잔유압력손실이라 하며(박영옥 et. al., 2009), Figure 8에 잔유압력손실의 변화경향을 고전압을 인가한 조건과 인가하지 않은 조건에서 여과속도의 변화에 따라 비교하여 나타냈다. 그림에서 보면 잔유압력손실은 고전압 인가조건에 크게 관계없이 여과속도가 증가하면 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 고전압을 인가한 조건의 잔유압력손실이 인가하지 않은 조건에 비해 다소 낮게 유지되는 경향을 나타냈다. 여과속도가 느린 조건에서 필터표면에 부착된 먼지입자층이 잘 털어지는 특성이 있고, 여과속도가 빠른 조건이 느린 조건에 비해 잔유압력손실이 높게 유지 하는 현상은 필터 표면에서 털어진 먼지입자가 여과속도가 빠르면 느린 조건에 비해 재 부착하는 량이 증가하기 때문에 나타난 현상으로 확인 되었다(Y. O. Park, et. al., 2008). 일반적으로 필터의 잔유압력손실은 먼지부하가 증가하면 증가하는 경향이 있고, 먼지입자층을 털어내기 위한 분사 압축공기의 압력이 높고 압축공기 분사시간이 길어지면 저하하는 특성이 있다. 따라서, 고전압을 인가한 조건의 잔유압력손실이 인가하지 않은 조건에 비해 다소 낮게 유지되는 것은 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 주름필터에 부여되는 먼지부하가 낮기 때문에 나타난 현상으로 볼 수 있다. 잔유압력손실이 낮으면 탈진조작 개시 압력손실에 도달하는 시간이 길어져 탈진조작 횟수가 줄어지기 때문에 빈번한 탈진조작에 의한 주름필터의 물리적 손상을 줄여주는 장점이 있다.

3.4 집진효율

먼지입자 크기별 질량 기준 집진효율인 부분집진효율에 고전압을 인가한 조건과 고전압을 인가하지 않은 조건에 대해서 여과속도에 따른 변화를 비교하여 Figure 9에 나타냈다. 먼지입자크기에 따른 부분집진효율은 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 조건에 비해 높게 유지되었고 여과속도가 느린 조건이 빠른 조건에 비해 높게 유지되었다. 여과속도가 0.5m/min 조건에서 가장 통과율이 높은 먼지입자크기는 2.5 ㎛로서 고전압을 인가한 조건과 인가하지 않은 조건에서 부분집진효율은 98.37 %, 93.57 %로 각각 유지되었다. 그러나 여과속도가 1.0 m/min인 조건에서 고전압을 인가한 조건에서 부분집진효율이 가장 낮은 입자크기는 1.7㎛이고 86.5%를 유지하였고, 고전압을 인가하지 않은 조건에서는 2.3㎛이며 72.7%를 각각 유지하였다. 고전압의 인가에 관계없이 여과속도가 빨라지면 부분집진효율이 가장 낮은 입자크기는 다소 작아 지는 경향을 확인하였다. 특히 여과속도가 1.0m/min 조건에서는 고전압을 인가 조건에서 부분집진효율이 가장 낮은 먼지입자크기가 고전압을 인가하지 않은 조건에 비해 작아지는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상은 고전압을 인가한 조건에서 주름필터 표면에 포

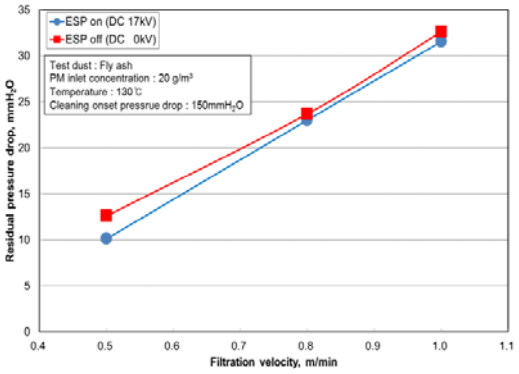


Figure 8. Residual pressure drop as a function of filtration velocity.

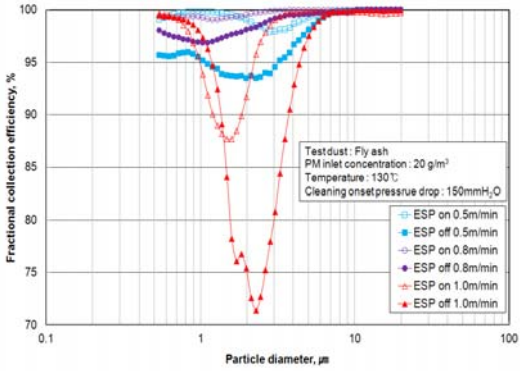


Figure 9. Fractional collection efficiency with electrostatic precipitator on and off.

집된 먼지입자층이 탈진조작시 분사된 압축공기의 팽창에 의해 정전기력에 의해 응집된 작은 먼지입자가 분리되어 떨어져 나온 현상으로 추정된다. Hinds는 먼지입자 크기가 작아지면 확산하전량과 전계하전량이 감소한다고 보고하였다(Hinds, 1999). 따라서 입자크기가 작아지면 하전량이 감소되어 주변의 먼지입자와의 응집력이 떨어지기 때문에 나타난 현상으로 추정된다.

Figure 10에 고전압을 인가한 조건과 고전압을 인가하지 않은 조건에 대해서 질량기준 총괄집진효율의 변화를 여과속도의 증가에 따라 비교하여 나타냈다. 여과속도가 빨라지면 총괄집진효율은 고전압을 인가한 조건에 관계없이 감소하는 경향을 나타냈고 고전압을 인가한 조건이 고전압을 인가하지 않은 조건에 비해 높게 유지하였다. 또한 여과속도가 0.8m/min 이상 조건에서 부터는 총괄집진효율의 감소 경향이 고전압을 인가하지 않은 조건이 고전압을 인가한 조건에 비해 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 여과속도가 0.5m/mi 조건에서 고전압을 인가한 조건의 총괄집진효율은 99.9%이었으나 고전압을 인가하지 않은 조건에는 99.1%로 약 0.8%의 차이가 있었으나, 여과속도가 1.0m/min 조건에서는 고전압을 인가한 조건에서는 99.4%이었으며 고전압을 인가하지 않은 조건에는 96.5%로 약 3% 정도의 차이가 났다. 일반적으로 집진필터에 의한 먼지입자의 포집에서 여과속도가 빨라지면 먼지입자의 운동에너지지가 크기 때문에 먼지입자들이 필터내부로 침투가 쉬워지고 필터 메디아를 통과하는 량도 증가하는 경향이 있다. 이와 같은 경향이 고전압을 인가하지 않은 조건에는 뚜렷하게 나타났으나, 고전압을 인가한 조건에서는 크게 감소하는 경향이 나타나지 않았다. 이와 같은 현상은 고전압을 인가한 조건에서는 먼지입자에 부여된 정전기력에 의해 먼지입자들과의 응집력을 띄고 있어 입자크기에 따른 필터 메디아의 통과율이 고전압을 인가하지 않은 조건에 비해 낮기 때문에 나타난 현상으로 볼 수 있다. 이와 같은 영향으로 고전압을 인가한 조건에서의 총괄집진효율은 여과속도의 증가에 따른 감소 경향이 완만한 것으로 나타났다.

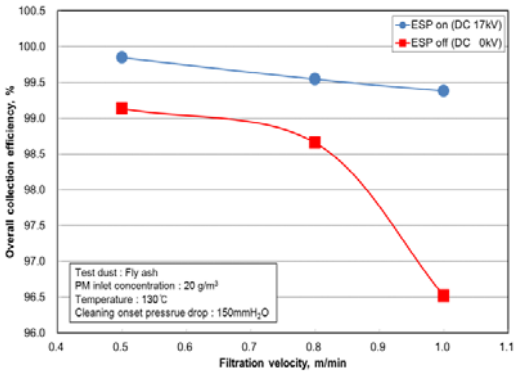


Figure 10. Overall collection efficiency with electrostatic precipitator on and off.

3.5 원소수은 제거성능 특성

Figure 11에 융합형 여과집진장치에 설치된 주름필터에 장착된 활성탄 종류에 따라서 원소수은 제거효율의 변화경향을 여과속도의 변화에 따라 나타나냈다. 그림에서 보면 활성탄의 종류에 관계없이 원소수은의 제거효율은 여과속도가 빨라짐에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 현상은 흡착제와 원소수은과의 접촉시간이 증가하여야 흡착성능이 증가하고 접촉시간이 짧아지면 감소하는 특성이 있기 때문에 나타난 현상으로 볼 수 있다. 원소수은의 제거효율은 ACF가 가장 낮게 유지하였고 다음은 RB4, RBHG3이며 HGR이 가장 높게 유지하였다. 실험에 사용된 활성탄 종류별 황 첨착량을 비교해 보면 ACF의 황 첨착량이 0.02wt.%, RB4는 1.0 wt.%, RBHG3는 16.5wt.%, HGR가 18.9wt.%로 가장 높은 농도의 황을 첨착하였다(박영옥 등 2010: 정주영, 2011). 여과속도가 0.5m/min 조건에서 ACF의 원소수은 제거효율은 29.7%, RB4은 40.3%, RBHG3는 71.9%로 나타났으나, 황의 첨착량이 가장 높은 HGR는 78.7%로 가장 높은 값으로 나타났다. 따라서 황의 첨착농도가 낮은 활성탄은 원소수은 제거효율이 낮고 황의 첨착량 농도가 높으면 높게 유지되는 것을 확인하였다. 원소수은은 활성탄과의 접촉에 의해 활성탄의 외부 표면에서 확산이 일어남과 동시에 활성탄의 기공내로 확산되면서 흡착이 일어난다. 이때 활성탄 표면과 기공에 첨착된 황과 접촉에 의해 화학흡착이 일어나며, 황과 원소수은의 화학흡착은 아래와 같은 반응식으로 나타낸다(차선영, 2004).

$$Hg + S = HgS \quad (3)$$

황을 첨착하지 않은 일반 활성탄은 흡착효율이 좋지 않아서 원소수은의 입구농도가 높은 조건에서 흡착이 시작되고 흡착시간이 길어 원소수은을 제거하는데 부적합한 것으로 보고하였고, 또한 황을 첨착한 활성탄이 황을 첨착하지 않은 일반 활성탄에 비해 원소수은의 흡착효율이 우수하다고 보고하였다(정종수, et. al., 2002).

4. 결 론

본 연구는 활성탄을 카트리지에 충진하여 주름필터에 장착과 원심력 집진원리, 전기집진원리 및 여과집진원리를 한 장치내에 조합한 융합형 여과집진장치에서 먼지입자와 원소수은의 동시 제거 특성을 관찰하였다. 융합형 여과집진장치의 압력손실 변화경향은 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 완만하게 증가하는 경향을 나타냈고, 탈진간격은 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 약 2배 정도 길게 유지하는 것을 확인하였다. 이는 고전압을 인가한 조건에서는 유입되는 먼지입자의 대부분이 원심력 집진부분과 전기집진부분에서 포집 제거되어 주름필터 먼지부하는 저감하였고, 또한 주름필터 표면에 포집된 먼지층이 정전기력에 의한 먼지입자의 응집으로 먼지층의 공극율이 커져 유체 흐름에 대한 통과저항이 감소한 것으로 확인되었다. 고전압을 인가한 조건의 부분집진효율이 인가하지 않은 조건에 비해 전체 먼지입자 크기 범위에서 높게 유지하였고, 총괄집진율도 여과속도에 관계없이 높게 유지하는 것을 확인하였다. 또한 고전압의 인가하거나 인가하지 않는 조건에 관계없이 여과속도가 빨라지면 집진효율이 감소하는 경향을 나타냈으나, 감소경향은 고전압을 인가한 조건이 인가하지 않은 조건에 비해 완만하였다. 융합형 여과집진장치에 설치된 주름필터에 장착한 활성탄 종류에 따라서 원소수은 제거효율의 변화경향을 여과속도의 변화에 따라 나타났다. 융합형 여과집장치에서 활성탄에 의한 원소수은 제거효율은 활성탄의 종류에 관계없이 여과속도가 빨라짐에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 황의 첨착농도의 활성탄이 황의 첨착농도가 낮은 농도에 비해 높은 것을 확인하였다. 융합형 여과 집진 장치에서 여과속도가 느린 조건인 0.5m/min조건에서 고전압을 인가하므로서 탈진간격은 약 1,050분, 잔유압력손실은 10 mmH_2O, 총괄집진효율은 99.9%의 유지를 확인하였고, 충진된 활성탄의 황첨착 농도를 19wt.% 이상 유지하면 원소수은 제거효율은약 80% 이상 유지 할 수 있음을 확인하였다.

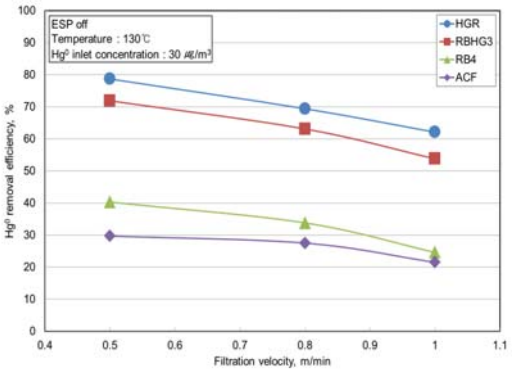


Figure 11. Relationship between filtration velocity and elemental mercury removal efficiency.

감사의 글

본 연구는 2008년도 환경부 차세대핵심환경기술개발사업의 재원으로 연구비를 지원 받아 수행된 연구임(No. 011-091-034).

참 고 문 헌

D. L. Roberts, et. al., (1998), “Novel Process for Removal and ecovery of Vapor Phase Mercury”, Final Report, DE-AC22-95PC95267-32, Department of Energy, Federal Energy Technology Center, Pittsburgh, PA, pp. 1-87.

Hinds, (1999), Aerosol Technology 2nd Edition, Jone Wily & Sons, Inc. 483p.

J. A. Korpiel and R. D. Vidic, (1997), “Effect of Sulfur Impregnation Method on Activated Carbon Uptake of Gas-Phase Mercury”, Environ. Sci. Technol., Vol. 31, pp. 2319-2325.

Karatza, D., Lancia, A., Musmarra, D. and Zucchini, C.,

(2000), Experimetal Thermal and Fluid Science, Vol. **21**, pp. 150-155.

S. V. Krishnan, B. K. Gullet and W. Jozevicz, (1994), “Sorption of Elemental Mercury by Activated Carbons”, Environ. Sci. Technol., Vol **28**, pp. 1506-1512.

T. D. Brown, et. al., (1999), “Mercury Measurement and Its Control: What We Know, Have Learned, and Need to Further Investigate”, J. Air & Waste Manage. Assoc., pp. 1-97.

Liu, W., Vidic, R.D. and Brown, T.B., (1998), “Optimization of Sulfur Impregnation Protocol for Fixed-Bed Application of Activated Carbon-Based Sorbents for Gas-Phase Mercury Removal”, Environ. Sci. Technol., Vol. **32**, p. 531-538.

Y. O. Park, Naim Hasolli and H. K. Choi, (2008), “Efficient and economic particulate collection from the flue gas by the advanced hybrid particulate collectors", 10th World Filtration Congress Proceedings, pp. III-367-III-3711.

정종수, 이성준, 김병화, 이태규, (2002), “실험실 규모 (Laboratory sacle)에서의 원자수은의 흡착실험”, 화학공학의 이론과 응용, Vol.8, No.1, pp. 1-4.

박영옥, 이시훈, 박석주, 정순관, 김상도, 박현설, 최호경, 임정환, 임영준,(2004), “미세먼지 및 증기상 수은 등 유해물질 동시제거용 고효율 복합기능여과시스템 개발에 관한 연구”, KIER-A36705, 환경부, 324p.

김상도, (2005), 접선유입방식 원심여과집진시스템 특성”, 충남대학교 박사학위 논문, pp.102-124.

정주영 (2011), “통합형 집진장치에서 미세입자상물질 및 원소수은의 동시제가 특성”, 연세대학교 대학원 석사학위논문, pp. 43-48.

노학재, “주름필터를 적용한 Hybrid 원심여과집진장치의 여과성능 특성”, 충남대학교 석사학위 논문, pp.4-27,(2008)

양현모, “입자의 크기에 따른 정전집진기내의 입자궤적의 변화 가시화”, 한국과학기술원 석사학위 논문, pp5-6,(1994)

차선영, “유황을 첨착시킨 첨착활성탄을 이용한 증기상 수은제거”, 대전대학교 석사학위 논문, pp. 26-27, (2002)

최호경, 이시훈, 박영옥 (2007), “Hybrid APCD 시스템에서의 활성탄 분사 흡착에 의한 가스상 수은제거”, 환경공동학술대회, pp. 301-302. (2007)

최호경, (2008),“조합형 집진장치에서의 미세 입자상물질 및 가스상 수은 제거 특성”, 한국과학기술원 박사 학위 논문, pp.15-70

박영옥, 정주영, 서용칠 (2008), PM/HAPs 동시처리를 위한 조합형 집진장치에서 활성탄 카트리지에 의한 수은의 제거 특성”, 2009년 한국대기환경학회추계학술대회 논문집, pp. 592-593.

박영옥, 정주영, 서용칠(2010), PM/Hg 동시제거용 융합형 집진장치에서 PM 제거 성능 특성”, 2010년 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp. 153-154.