

Hi-Filter에 의한 연소 배가스 내의 PM, SOx 및 중금속 제거

최호경*, 박영옥
한국에너지기술연구원 제로에미션연구센터
(hkchoi@kier.re.kr*)

Removal of PM, SOx, and Heavy Metals from Flue Gas in Hi-Filter

Ho-Kyung Choi*, Young-Ok Park
Zero Emission Technology Research Center, Korea Institute of Energy Research
(hkchoi@kier.re.kr*)

서론

본 연구에서는 조합형 집진장치인 Hi-Filter 에서 중유 연소 배가스 내의 PM, SOx 및 대 표적 유해 중금속인 니켈과 바나듐 제거 효과를 고찰하였다. Hi-Filter는 전기집진과 여과 집진 원리를 하나의 장치로 조합시킨 장치로서 산업체에서 발생하는 다중 유해 오염물질의 고도 처리를 위해 개발 중인 융합형 시스템에 적용되는 집진장치이다.

중유 연소 배가스에 함유된 SOx는 Hi-Filter 전단에서 분말상의 건식 흡수제를 덕트 내 에 분사하여 제거한다. 배가스 내에 주입된 흡수제는 배가스 내에 함유된 입자상 오염물질 과 함께 Hi-Filter에 포집되어 제거된다.

실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 Hi-Filter는 여과집진 원리와 전기집진 원리가 단일 시스템으로 조합된 하이브리드형 집진장치이다. Hi-Filter로 유입된 합진가스는 유도 길에 의해 여과포로 곧바로 유입되지 못하고 방전극과 집진판 사이에 형성되어 있는 하전 영역으로 유입이 된다. 하 전 영역에 유입된 입자는 코로나 방전에 의해 전기적으로 하전 되고 정전기적 인력과 합진 가스의 흐름에 의해 집진판 쪽으로 이동하여 포집된다. 집진판에서 포집되지 않은 나머지 입자는 여과포에 도달하여 포집된다.

Fig. 1에 본 연구에서 사용된 실험장치인 파일럿 규모 Hi-Filter의 실험 공정도를 나타내 었다. 본 실험장치의 최대 처리용량은 30m³/min이며, 중유 보일러에서 발생하는 연소 배가 스투 실험용 가스로 사용한다. 배가스 발생을 위한 연료로는 황 함량이 0.3wt%인 중유를 사용하였다. 흡수제로는 알칼리 흡수제인 고효율성 Ca(OH)₂를 사용하며 Ca/S 몰비로 2만큼 입자 공급장치(9)를 사용하여 주입하였다.

배가스의 유량을 25m³/min로 하면 흡수제가 Hi-Filter 전단의 덕트에 체류하는 시간은 약 0.7초 정도이다. 흡수제의 SOx 저감효과를 높이기 위해 흡수제가 주입되는 전단에 노즐 을 통해 수분을 적당량 분사하였다.

배가스 내 입자의 검출에는 APS3321을 이용한 측정과 원통여지법을 병행하여 사용하였 다. 황 성분의 검출에는 Modified ASTM D3226-73T 방법을 사용하였고, 이의 분석에는 LECO 사의 SC-432DR 분석기를 이용하였다. 니켈과 바나듐 등의 중금속 검출에는 ASTM D5708-05 방법을 사용하였고, Perkin-Elmer 사의 ICP-OES 분석기를 이용하여 함량을 분석하였다.

실험 시 배가스 유량은 정상조건에서 약 25m³/min로 여과포에서의 여과속도로 환산하면 약 4.3m/min이다. Hi-Filter 유입구에서의 배가스 온도는 약 210℃로 설정하였다. 집진효 율을 높이기 위해 Hi-Filter의 전기집진부에 인가되는 전압은 약 25kV로 설정하였다.

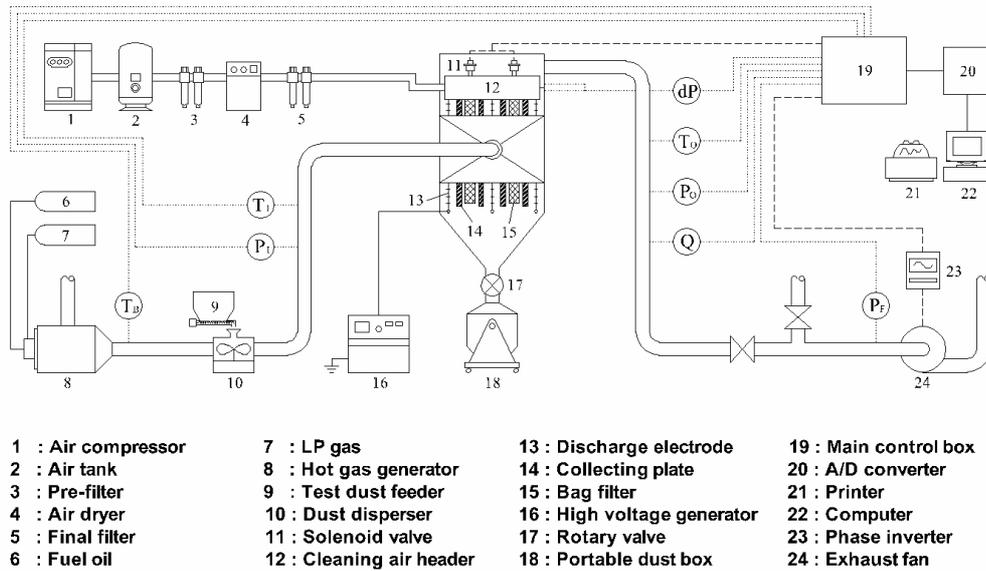


Fig. 1 파일럿 규모 Hi-Filter의 실험 공정도

실험 결과

Fig. 2에 흡수제인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 Hi-Filter의 유입 덕트 내에 분사하였을 때 Hi-Filter에 의한 입경별 부분집진효율을 나타내었다. Hi-Filter에 유입되는 입자는 흡수제 입자와 중유 연소에 의한 비산재이다. 흡수제의 입경은 질량중위경(MMD)으로 약 $8.6\mu\text{m}$ 이며, 중유 비산재의 질량중위경은 약 $4.1\mu\text{m}$ 이다. 흡수제를 Ca/S 몰비로 2만큼 주입할 경우 Hi-Filter 유입구에서 측정되는 입자의 농도는 약 $0.6\text{g}/\text{m}^3$ 이다.

Fig. 2에서 약 $1.2\mu\text{m}$ 정도 입경의 입자에 대한 부분집진효율이 가장 낮게 나타난다. 이것은 이 입경 영역에서는 확산에 의한 입자의 포집과 관성에 의한 입자의 포집 기작이 모두 취약하기 때문이다.

Fig. 3은 Hi-Filter의 총괄집진효율로서 전 입경영역과 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 총괄집진효율을 각각 나타낸 그래프이다. 그래프에서 전체 입자의 총괄집진효율은 99.999%, $\text{PM}_{2.5}$ 의 총괄집진효율은 99.988%로 나타났다. 이것으로부터 Hi-Filter가 모든 입경영역에 걸쳐 매우 높은 집진성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 흡수제인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 Hi-Filter의 유입 덕트 내에 분사하였을 때 흡수제가 주입되기 전단인 보일러 출구와 흡수제의 역할이 종료되는 Hi-Filter 후단에서 각각 측정한 SO_2 와 SO_3 의 농도를 나타낸 그래프이다. 측정 결과 흡수제 주입 전후의 SO_2 농도는 각각 85.0ppm, 19.0ppm이며, SO_3 의 농도는 각각 0.5ppm, 0.0ppm으로 나타났다.

이론적으로 계산해 보면 0.3wt%의 황이 함유된 중유를 연소시킬 경우 보일러 후단에서 SO_x 의 농도는 약 150ppm 정도가 나와야 하지만 실제로 검출된 값이 그보다 낮게 나타난 것으로 미루어 사용된 중유의 황 함량이 공칭 값보다 매우 낮음을 짐작할 수 있다. 한편, Hi-Filter 후단에서 SO_3 의 농도가 0으로 나타나는 것은 채취된 SO_3 의 양이 분석기의 검출 최저한계를 벗어날 정도로 적게 검출되었기 때문이다.

Fig. 5는 흡수제 주입 전후에 측정된 배가스에 함유된 니켈 및 바나듐의 농도를 나타낸 그래프이다. 측정 결과를 보면 바나듐보다는 니켈의 배출량이 월등히 많음을 알 수 있다.

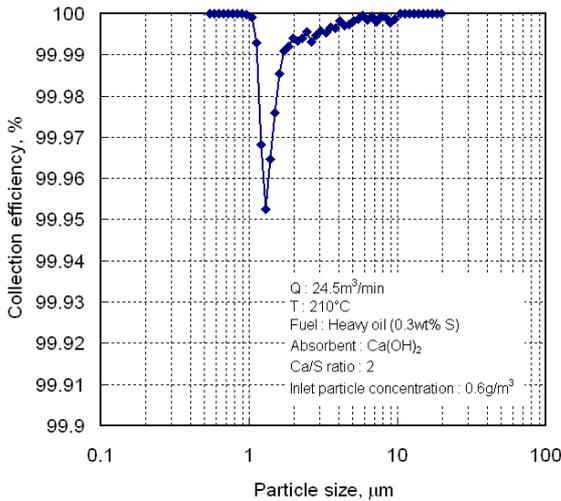


Fig. 2 Hi-Filter에서의 부분집진효율

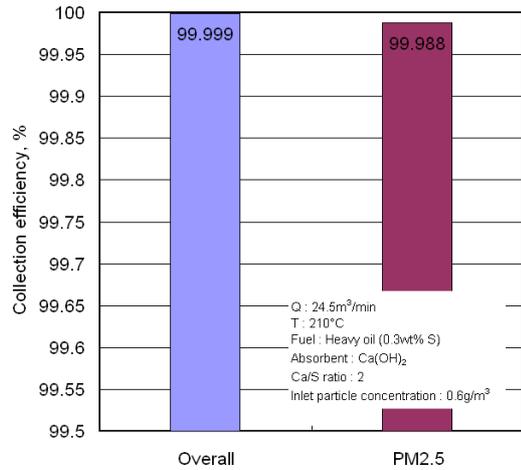


Fig. 3 Hi-Filter에서의 총괄집진효율

수은과 같이 휘발성이 높은 종류의 중금속과는 달리 니켈이나 바나듐과 같은 종류의 중금속은 흡수제에 쉽게 흡수 또는 흡착될 뿐만 아니라 배가스의 온도가 감소함에 따라 상당량이 입자상으로 변환되어 집진필터에서 제거된다. 따라서 Hi-Filter 후단에서 측정된 니켈 및 바나듐의 농도는 보일러 후단에서 측정된 값에 비해 상당히 낮게 나타난다.

Fig. 6은 이전의 결과를 바탕으로 계산한 SO₂, SO₃, 니켈 및 바나듐의 제거 효율을 나타낸 결과이다. 여기서 제거 효율은 보일러 출구에서 측정된 값과 Hi-Filter 후단에서 측정된 값을 바탕으로 계산한 결과이다. SO₂ 및 SO₃의 제거 효율은 각각 77.6% 및 100%로 나타났다. 흡수제를 주입하였을 경우 SO₃의 제거 효율이 100%로 나타난 것은 SO₃의 검출량이 분석기의 검출 최저한계를 벗어났기 때문이다.

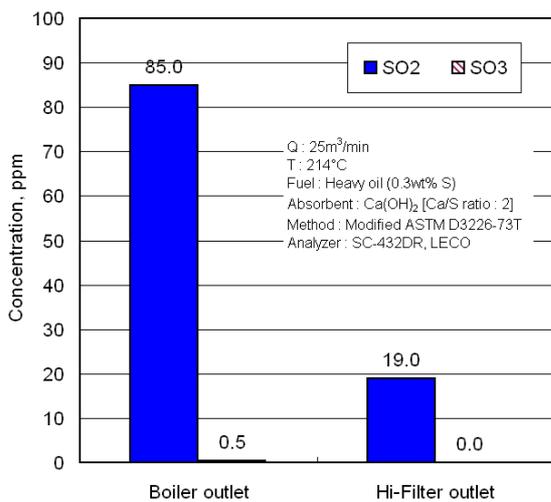


Fig. 4 흡수제 주입에 의한 SOx 농도 변화

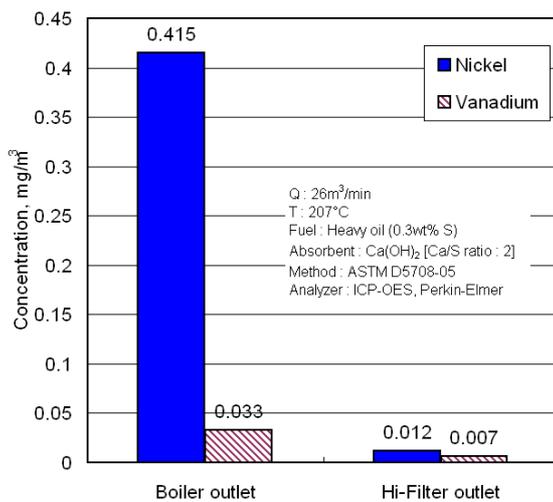


Fig. 5 흡수제 주입에 의한 중금속 농도 변화

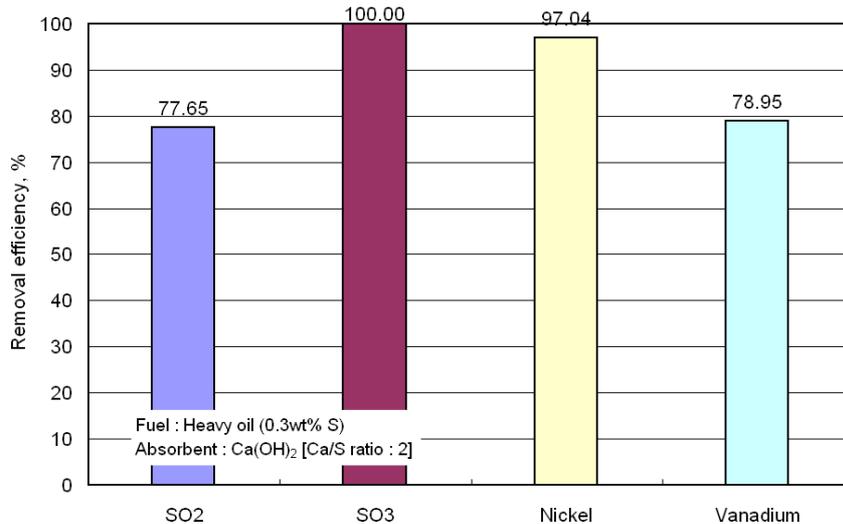


Fig. 6 Hi-Filter에서 흡수제 주입에 의한 오염물질 저감 효율

한편, 중금속의 경우 니켈의 제거효율은 97%, 그리고 바나듐의 제거효율은 79%로 각각 나타났다. 배가스가 덕트 내에 체류하는 시간이 0.7초 정도인 것을 감안한다면 이들 오염물질에 대한 제거효율은 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 Hi-Filter가 일종의 반응기 역할을 하게 되면서 Hi-Filter 내부에 체류하는 흡수제에 의해 보다 많은 SO_x 및 중금속들이 추가로 제거되기 때문인 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 조합형 집진장치인 Hi-Filter 에서 중유 연소 배가스 내의 PM, SO_x 및 대표적 유해 중금속인 니켈과 바나듐 제거 효과를 고찰하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

Hi-Filter에서 배가스의 여과속도를 정상조건에서 약 4.3m/min, 배가스 온도를 약 210°C로 설정하였을 때 전체 입자에 대한 총괄집진효율은 99.999%, PM_{2.5}의 총괄집진효율은 99.988%로 나타났다.

Hi-Filter 전단에서 분말상의 건식 흡수제를 덕트 내에 분사했을 때 SO₂ 및 SO₃의 제거효율은 각각 77.6% 및 100%로 나타났다. 또한, 중금속의 경우 니켈의 제거효율은 97%, 그리고 바나듐의 제거효율은 79%로 각각 나타났다.

이러한 결과들로부터 Hi-Filter가 모든 입경영역에 걸쳐 매우 높은 집진성을 보일 뿐만 아니라 Hi-Filter가 일종의 반응기 역할을 하면서 Hi-Filter 내부에 체류하는 흡수제에 의해 보다 많은 SO_x 및 중금속까지도 추가로 제거할 수 있음을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 중기거점기술개발사업의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부입니다.