

## 금속필터를 사용한 석탄가스화 분진 및 표준 분진의 집진 효율과 운전특성

윤용승<sup>†</sup> · 정석우 · 이승종

고등기술연구원 플랜트엔지니어링 본부  
17180 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 178-28  
(2019년 3월 19일 접수, 2019년 4월 10일 채택)

### Dust Removal Efficiency and Operation Characteristics of Metal Filters for Coal Gasification Fines and Standard Dust Sample

Yongseung Yun<sup>†</sup>, Seok Woo Chung and Seung Jong Lee

Plant Engineering Division, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17180, Korea

(Received 19 March 2019; accepted 10 April 2019)

#### 요 약

석탄화력발전소에서 발생하는 분진 효율을 높이고 미세먼지와 극미세먼지까지 집진할 필요성이 높아지고 있다. 상압 영역에서 운전되는 플랜트 발생 분진 제거를 위해서는 백필터나 전기집진기를 사용하나, 고온고압에서 운전되는 석탄가스화와 같은 경우는 금속필터나 세라믹필터가 사용된다. 고온고압에서 분진 집진을 위해 2종의 5겹 압착/소결한 금속필터를 제작하였고 이를 사용했을 때 분진 포집효율과 10  $\mu\text{m}$  이하 입자에 대한 포집 성능을 파악하였다. 석탄가스화 분진에 대한 금속필터의 집진효율은 무게기준으로 99%대에 달하였다. 제작한 금속필터 2종의 미세먼지 입자 이하( $< 2.5 \mu\text{m}$ ) 크기까지 집진성능을 파악하고자 JIS 분진 표준시료를 대상으로 실험을 수행하였고, 1~2.5  $\mu\text{m}$  입자크기 범위에 대해 97%와 70~82%의 집진 성능을 확인하였다. 1  $\mu\text{m}$  이하 입자크기 영역에서는 입자크기가 작아짐에 따라 제작한 금속필터의 집진효율이 급격히 낮아짐을 볼 수 있었다. 이러한 1  $\mu\text{m}$  이하 입자들에 대한 집진 제한점을 극복하고자 금속필터 성능의 개선 방안을 제시하였다.

**Abstract** – Demand for improving dust removal efficiency in coal power plants and the dust removal requirement to the level of capturing fine particulate matter and ultrafine particles have been increasing. While bag filter and electrostatic precipitator (ESP) are typically used for dust removal in the processes operating at atmospheric pressure, metal filters or ceramic filters are employed for dust which is produced at high temperature/pressure system as in coal gasification. For dust removal at the high temperature/pressure conditions, two metal filters of five compressed/sintered layers were manufactured and applied to analyze the dust removal characteristics. Manufactured metal filters exhibited more than 99% dust removal efficiency on coal gasification fine particulates in mass basis. To evaluate the fine particulate removal efficiency of less than 2.5  $\mu\text{m}$ , JIS standard fine sample was used and confirmed the removal efficiencies of 97% and 70~82% on the fine particulates of 1~2.5  $\mu\text{m}$  size range. For the size range of less than 1  $\mu\text{m}$ , dust removal efficiency of manufactured metal filters significantly degraded with smaller particle size. Improving methods are proposed to overcome the limitations in applying to fine dust of less than 1  $\mu\text{m}$ .

Key words: Dust, Metal filter, Collection efficiency, Fine particulate matter, Ultrafine particle

#### 1. 서 론

자연 상태에서 얻게 되는 석탄, 바이오매스 등 고체연료는 기본적으로 무기물질인 회분성분을 함유하고 있다. 토양과 접촉을 하여 생

성되는 과정에서 필연적으로 토양 성분이 이들 고체연료에 함유되고 이 회분이 연소, 열분해, 가스화 등 고온이 수반되는 열적처리 과정을 거치면서 분진이 발생된다.

최근 미세먼지 저감에 대한 필요성이 증대되고 있고 석탄화력발전소 등 고체연료를 사용하는 시설에서 발생하는 미세먼지를 저감하라는 사회적 요구가 강화되고 있다. 몇 년 사이 국내에서 악화되고 있는 미세먼지 문제는 어떤 형태로든 저감이 필요한 상황이다. 분진은 50  $\mu\text{m}$  이하인 총먼지(TSP, Total Suspended Particles)와 10  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$ , 0.1  $\mu\text{m}$  크기를 기준으로 분진, 미세먼지(Fine Particulate Matter), 극미세먼

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ysyun@iae.re.kr

<sup>‡</sup> 이 논문은 연세대학교 설용건 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지나노미세먼지(Ultrafine Particles, UFP)로 구분한다. 하지만 국내에서는 미세먼지를 PM10으로 10  $\mu\text{m}$  이하인 입자, 초미세먼지를 PM2.5로 명칭하여 2.5  $\mu\text{m}$  이하 크기인 입자로 표기하고 있다. 건강 측면에서 분진크기가 10  $\mu\text{m}$  이상인 입자는 대부분 코에서 걸러지고 3~10  $\mu\text{m}$  입자들은 호흡기관 앞부분에 쌓일 수 있다. 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 분진들은 폐 내부로 들어가서 수주일에 걸쳐서 배출되기도 하지만 침적되기도 하는 문제로 호흡계에 영향을 주는 입자구간으로서 알려져 있다.

석탄을 사용할 때 발생하는 분진은 연소나 가스화의 반응온도에 따라 크기 분포가 달라진다. 회재를 용융시키는 분류층 석탄가스화기 경우에는 반응기 내부온도가 1,400~1,600  $^{\circ}\text{C}$ 에 달하여 회분에 함유된 저온휘발 무기물질과 중금속물질들이 휘발하고 이들이 반응기를 지나 저온 영역에서 응집하면서 수 마이크로 크기의 구형 형태의 미립자를 형성하는 특징이 있다. 가스화가 아닌 연소에 기반한 석탄화력발전 보일러 내부 화염영역에서도 무기물질들이 휘발하여 0.01~0.03  $\mu\text{m}$  크기의 초미세 에어로졸이 형성되고 보일러 외부로 가면서 급격히 냉각되어 2~5초 사이에 응축, 응결이 되어 1~10초 사이에 0.03~0.07  $\mu\text{m}$  크기로 극미세입자가 커지는 것으로 보고되고 있다[1]. 이러한 휘발-응축 메커니즘을 거치면서 극미세입자가 형성된다.

전기집진기나 백필터와 같은 기존 분진제거 장치들은 대부분 10  $\mu\text{m}$  이상 입자크기 영역에서는 효과적이지만, 최근 이슈가 되는 PM2.5와 극미세먼지에 대해서는 집진 효율이 높지 않은 것이 일반적이다. 입자크기가 너무 작아서 중력이나 관성력에 의한 입자제거 방식이 적절히 작동되지 않기 때문이다. 특히, 현재 사용되는 일반 전기집진기는 0.04  $\mu\text{m}$ (40 nm) 이하의 극미세먼지에 대해서는 효과가 없다고 보고되고 있다[2]. 10  $\mu\text{m}$  이상 크기의 분진과 2.5~10  $\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 현재의 분진제거설비인 전기집진기, 백필터 등을 통하여 상당히 고 효율로 포집이 가능하지만, 극미세먼지 제거는 아직 저감기술과 저감설비 측면에서 향상시킬 부분이 많다.

최근에 개발된 백필터는 폐기물 소각설비에서 발생하는 0.1  $\mu\text{m}$  이하 극미세먼지에 적용했을 때를 예로 살펴보면 90~99.9%의 집진 효율을 보여주고 있기도 하다[3,4]. 일반적으로 미세먼지와 극미세먼지 영역의 입자크기 분진에 대해서는 전기집진기보다 백필터가 더 효과적이라고 보고되고 있다[3]. 1  $\mu\text{m}$  이하 입자에 대해서 전기집진기 집진효율이 96.5%인데 비해 백필터는 100%에 달하는 것으로 보고되고 있다[5].

하지만 높은 압력에서 운전되는 석탄가스화공정 등에서는 백필터 사용이 제한적이고 특히 200~600  $^{\circ}\text{C}$ 로 높은 온도로 배출되는 합성 가스에 적용은 더욱 어렵다. 일반적으로 백필터 재질이 견디는 온도 제한으로 운전 한계온도는 200~250  $^{\circ}\text{C}$ 이다. 따라서 고온고압에서 운전이 되는 석탄가스화 공정에서는 세라믹필터나 금속필터가 미세먼지 집진에 일반적으로 사용된다.

미세분진을 완벽하게 잡으려고 하면 비용이 많이 들어서이지 기술적인 방법은 많이 있다. 세라믹필터의 공극을 극히 작게 만들어 오염가스를 통과시키면 완벽한 집진이 기술적으로는 가능하겠지만 차압이 너무 커져서 실제 공정에 사용은 제한적이다. 이러한 세라믹필터는 공정 운전압력이 높아 상당한 차압 손실을 감당할 수 있는 고압유동층이나 고압가스화 공정에서 적용이 가능하다. 높은 차압 손실을 줄일 수 있으면서 고온고압 조건에서 세라믹필터와 같은 집진성능이 가능하게 할 수 있는 대안이 금속필터이다.

수 마이크로 크기의 미립입자들을 제거하기 위해서는 금속필터나 세라믹필터가 유용한데, 앞서 설명한대로 차압이 커져서 상압에서 운영되는 공정에서는 사용이 어렵다. 하지만, 석탄가스화 발전 등과 같이 고압에서 운영되는 공정이라면 사용이 가능하다. 한국서부발전에서 2017년에 건설 운영 중인 300 MW 규모 IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) 발전소는 38~42 bar에서 석탄가스화가 이루어지며, 2010년 이후 건설 운영되고 있는 세계 모든 석탄 IGCC 발전소는 대부분 31 bar 이상에서 가스화기가 운전된다. 1990년대 처음 건설된 석탄 IGCC 발전소들도 모두 최소한 22 bar 이상 압력에서 가스화기가 운전되었다. 석탄 IGCC 발전소는 아직 건설비용이 높은 단점이 있지만, 기존 미분탄연소 석탄화력발전소 대비 발전효율이 높고 환경친화적(탈황율 99.9%, NOx 25 ppm 이하 발생, NOx는 SCR 추가 설치시 5 ppm 이하)이고 다양한 저급연료(석탄, 바이오매스, 폐기물, 정유공장부산물)를 사용할 수 있는 장점이 있다.

금속필터에는 소결(sintered) 금속필터, 얇은 공극이 있는 금속판을 여러겹 압착한 금속필터 등 형태가 있으며, 세라믹필터는 대부분 강도를 유지하는 지지층과 미세입자 통과를 막는 얇은 코팅 세라믹층으로 구성된다. 일반적으로 금속필터는 세라믹필터에 비해 기계적 강도가 매우 크기 때문에 분진을 탈기 위한 역세정시 열충격과 전후단 차압 증가로 인한 기계적 스트레스가 발생하더라도 파손이 되지 않는 장점이 있다. 하지만 합성가스에 포함된 H<sub>2</sub>S 가스 등에 장시간 노출되면 부식에 의한 파손 가능성이 단점이다. 이러한 금속부식과 같은 단점은 내부식성 코팅 등의 방법으로 해결되고 있다.

본 연구에서는 석탄가스화에서 발생하는 분진을 대상으로 금속필터를 제작 적용하여 분진포집 효율과 미세먼지 영역까지 제거되는 성능을 파악하였다. 또한, 미세먼지/극미세먼지를 고효율로 집진하기 위한 기술개발 방향도 제시하였다.

## 2. 실 험

### 2-1. 분진 집진 실험설비

석탄가스화기로부터 발생한 분진을 사용한 집진실험은 Fig. 1에 도시된 설비를 사용하였다. 분진 공급장치는 분진 저장을 위한 분진 공급 호퍼, 공급되는 분진량을 실시간 확인하기 위한 로드셀, 분진 공급용 스크루 및 구동 모터로 구성되어 있으며, 분진 공급량 제어는 고압 분진공급장치 하부에 구성된 분진 공급용 스크루의 회전속도 조절을 통해 이루어진다.

집진장치 설계 유량은 100 Nm<sup>3</sup>/h이며, 집진장치 입구배관으로 분진 공급용 10 Nm<sup>3</sup>/h 가스 공급이 필요하기 때문에 50 Nm<sup>3</sup>/h급 MFC (Mass Flow Controller) 3대를 구성하였다. 분진공급 조건에서 집진필터의 분진 포집효율 확인을 목적으로 집진장치 입구와 출구 배관에는 분진농도 측정용 바이패스 배관을 구성하였고, 가스흐름 제어용 밸브를 설치하였다. 분진농도 측정은 가스흐름이 바이패스 배관으로 흐르도록 유로를 변경시킨 후 바이패스 배관에 설치된 분진농도 측정용 시료가스 포집 포트를 통해 이루어지도록 하였다.

시험용 집진장치 전단에는 시험가스를 운전온도로 제어하기 위한 간접 가열방식의 가스버너 적용 시험가스 가열장치가 구성되어 있다. 가스 가열장치를 통과한 고온의 가스는 배관을 통해 집진장치로 공급되는데, 이때 배관 표면 열손실에 의한 가스 냉각현상 제어를 목적으로 열선가열 및 보온재를 설치하였다. 가열장치에서 시험용 집진장치 입구까지 설치된 열선가열 제품은 2.5 kW의 용량으로 가

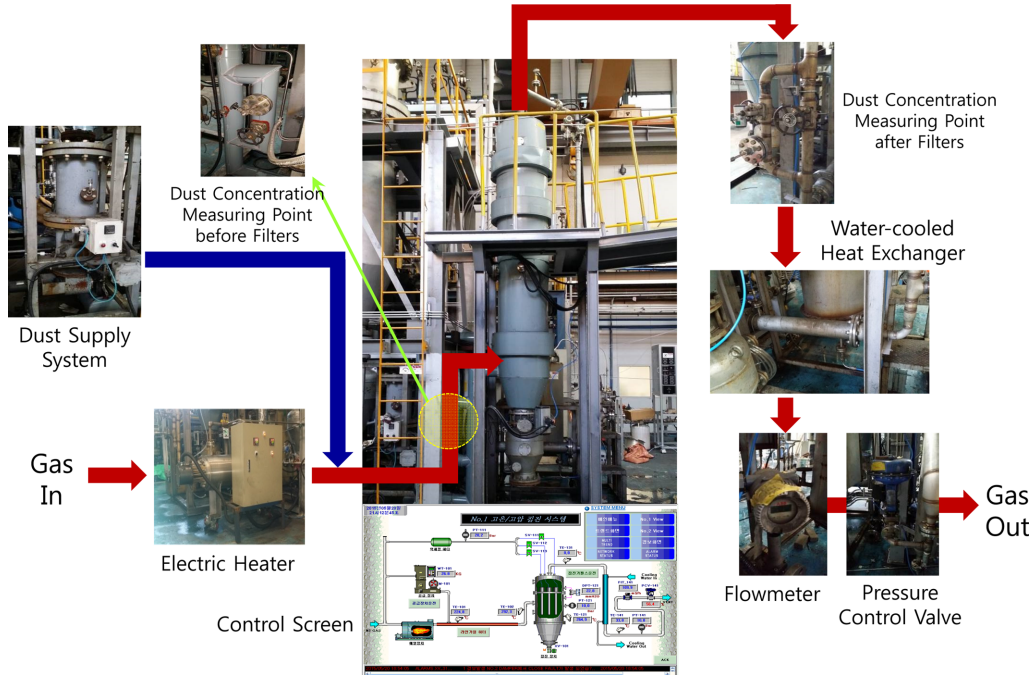


Fig. 1. Dust removal test facility using fine particulate matter obtained from coal gasifier.

스 운전온도가 300 °C임을 고려하여 최대 400 °C까지 가열이 가능하도록 하였다. 배관 외부에는 열손실 최소화를 위해 세라믹 파이버 (ceramic fiber) 보온재를 설치하였다.

분진공급장치는 분진 공급호퍼 하부에 가교현상 제어를 위한 분진 유동화용 날개가 설치되어 있다. 분진 유동화용 날개 회전축과 분진공급 호퍼 외부에 구성된 구동용 모터 축 연결부에는 메커니컬 실을 설치함으로써 고압으로 운전되는 분진공급장치 내부 가스가 축 연결부위를 통해서 외부로 배출되는 것을 차단하였다. 분진공급용 스크루 회전 모터에 회전속도 제어용 인버터를 구성함으로써 분진공급 스크루의 회전수 제어를 통해 공급되는 분진량을 제어하였다. 시험용 집진장치를 운전온도까지 승온 소요시간은 1시간 30분 이내이며, 등은 유지 시 온도편차는 ±5 °C 이내로 제어되었다. 역세가스 공급 압력은 집진장치와 차압 10 bar가 유지되도록 제어하였다. 필터 역세는 집진필터 차압이 300 mmH<sub>2</sub>O에 도달하였을 때 실시하였다.

금속필터 2종에 대하여 표준 분진시료를 사용한 실험은 Fig. 2에

나타난 설비를 사용하였다. 사각 덕트 형태의 필터 거치부와 스크루 피더 방식의 분진공급장치, 분진 이송용 송풍기, 필터 입출구의 분진농도 측정용 입자계수 센서 등으로 구성되어 있다.

분진농도 측정장치는 온도계, 압력계, 차단 밸브, 압력조절밸브, 유량계, 분진 포집필터용 홀더 등으로 구성된다. Fig. 3에 분진농도 측정설비를 볼 수 있다. 분진함유가스가 통과하는 라인은 1/2 inch SUS316 튜브를 적용하였다. 이송라인 내부에 분진함유가스 중의 분진이 침적되는 현상을 방지하기 위하여 배관의 가스흐름 유속을 12 m/s로 설정하였다. 배관 내부압력은 집진장치의 운전압력과 동일하게 하였으며, 집진장치 입구가스의 온도는 200~300 °C 범위인데 분진농도 측정장치로 합성가스가 유입되는 과정에서 온도저하에 따른 응축수의 발생을 방지하기 위하여 분진함유가스 이송라인 외부에 열선을 설치하여 동일한 온도가 유지되도록 하였다. 분진농도 측정 시에는 분진 함유가스를 등속흡입 하는 방식으로 진행하였는데, 집진장치 전단부는 매우 고농도의 분진이 함유되어 있으므로 포집시간을 5~30초 정도 유지하였고 집진장치 후단은 필터에서 분진이 여

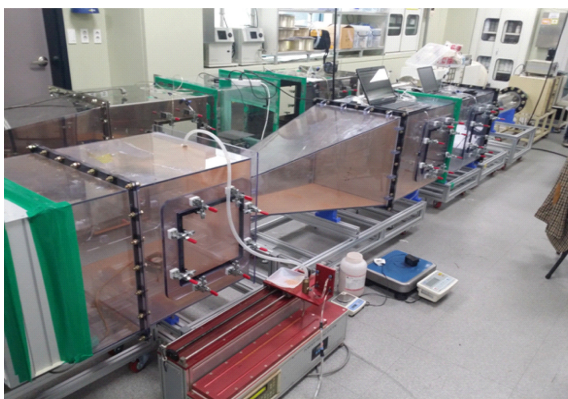


Fig. 2. Dust removal test facility using JIS standard fine particulate matter.

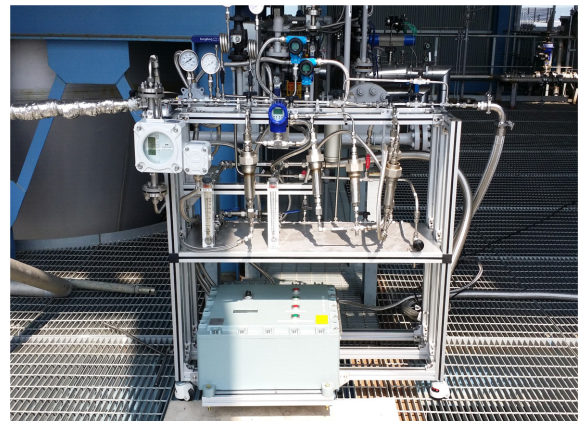


Fig. 3. Dust concentration measuring equipment.

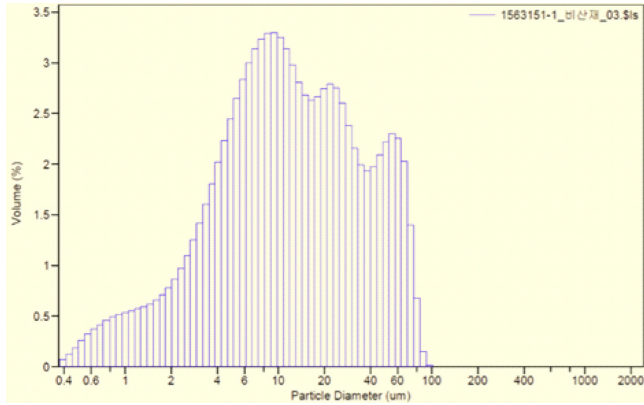


Fig. 4. Particle diameter distribution diagram of fly-ash fines obtained from coal gasifier.

과된 이후이므로 포집시간은 1~3분 정도였다. 사용된 텀블은 1,000 °C 까지 사용이 가능한 퀴즈 파이버(quartz fiber) 재질로서 25×22×90 mm 크기인 ADVANTEC사의 No.88R이었다.

2-2. 분진 시료

본 연구에 사용된 두 가지 분진은 고등기술연구원에서 보유하고 있는 3톤/일급 석탄가스화기 운전과정에서 집진장치에 포집된 비산재(fly-ash)와 일본 JIS 표준 분진시료이다.

석탄가스화 비산재는 Fig. 4와 Table 1에서 보듯이 평균 입경은 약 18.8 μm이고, 평균 겉보기 밀도는 0.406 g/cm<sup>3</sup>인 것으로 분석되었다. 당연히 고온 가스화 과정을 거쳐 휘발분이 빠지고 유기물질 전환이 이루어졌기 때문에 발생분진은 미분탄에 비해 크기가 작게 된다. 일반 석탄의 겉보기 밀도가 0.6~0.9 g/cm<sup>3</sup>인데 비해서 가스화 분진은 낮은 값을 보이고 있다.

시험에 사용된 2번째 분진으로는 표준입자인 JIS (Japanese Industrial Standards) 분진시험입자 1, 클래스 11이 사용되었다. Fig. 5 에는 본 시험에서 사용한 분진의 입도 분포도를 나타내었는데, 분진 대부분이 0.2~20 μm 크기 범위였다.

석탄가스화분진은 0.4 μm부터 100 μm까지 넓은 범위의 분진으로 구성되어 있는 반면에, JIS 표준 분진시료는 0.2 μm부터 20 μm까지 입자분포로서 주로 미세먼지 크기의 입자를 대표하는 시료이다.

2-3. 금속 필터

5겹 스테인레스 쉬트(sheet)를 5겹 소결 압착시킨 금속필터 2종을 제작하여 사용하였다. 금속필터 1은 일본에서 수입한 스테인레스 쉬트를 사용하여 제작한 금속필터를 금속필터 No. 1, 국내에서 생산된

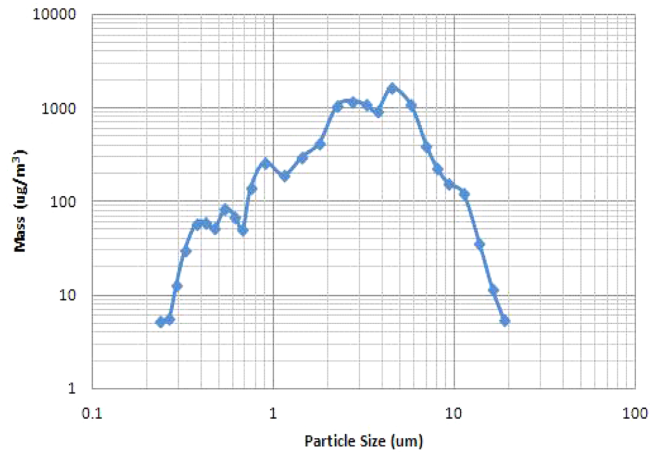


Fig. 5. Particle diameter distribution of JIS standard fine particulate matter sample.

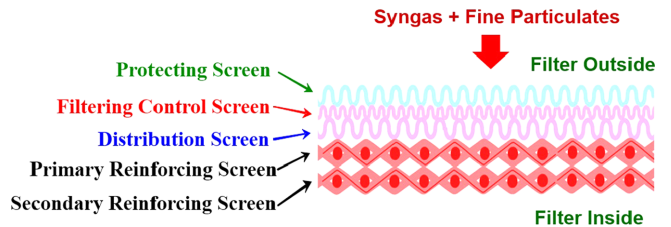


Fig. 6. Cross-sectional diagram of metal filter manufactured through compression/sintering with 5 layers of stainless steel sheets.

스테인레스 쉬트를 사용한 금속필터를 금속필터 No. 2로 본 연구에서는 명명하였다. 시험에 사용된 수입 쉬트 여과재는 590×590 mm 크기이며, 수입 쉬트를 적용한 금속필터 크기는 φ62.5×L1,530 mm 이며, 여과재 재질은 합성가스에 의한 부식특성을 고려하여 부식성에 강한 SUS316L이 적용되었다. 국산 쉬트를 사용한 금속필터도 수입쉬트 특성과 같이 주문 생산되었다. 금속필터는 메쉬 형태의 여과망을 5겹으로 압착/소결하여 제작되었으며, 여과망의 기공은 5 μm를 적용하였다.

5겹 압착/소결 금속필터는 고온/고압의 배출가스 중 분진입자의 제거를 위하여 각각의 기공 크기가 다른 금속 재질의 메쉬(mesh)를 진공 조건에서 압착/소결하여 제조하는데, 각 메쉬는 여과재어 스크린(screen), 필터 보호를 위한 보호 스크린, 필터 지지체 형상 유지를 위한 보강 스크린, 유입가스의 균일한 분산을 위한 분산 스크린으로 구성된다.

금속필터는 상용급 석탄 IGCC 발전소에서 사용하는 세라믹필터와 같은 사이즈(1.53 m 높이, 외경 6.25 cm)로 제작되었으며, 1개 금속

Table 1. Bulk density of fly-ash fines obtained from coal gasifier

Sample name	Test	Weight (g)	Volume (ml)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )
Koptri-1563151-1	1st	40.37	100	0.404
	2nd	40.88	100	0.409
	3rd	40.60	100	0.406
	SD	0.26	0	0.003
	CV(%)	0.63	0	0.63
	Average	40.62	100	0.406

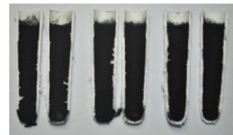
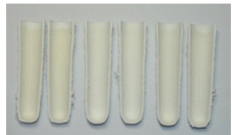
SD : Standard deviation

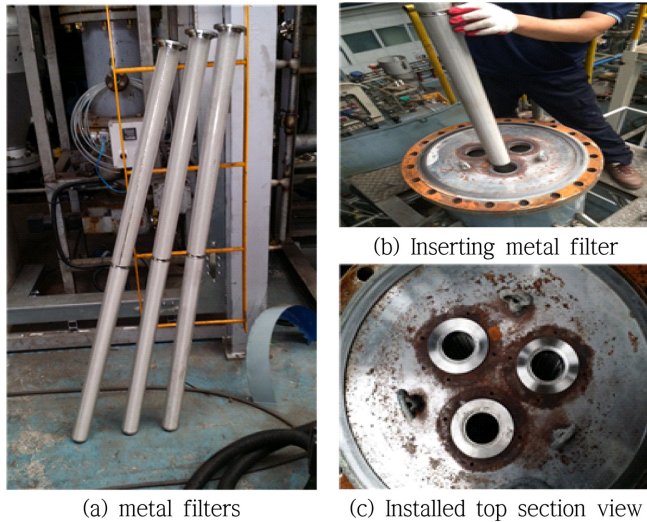
CV : Coefficient of variation=(SD/average)×100

**Table 2. Specification of metal filter**

Item	Metal filter
Manufacturer	T Co. in Korea
Model	5 layers of compression/sintering
Length [mm]	1,530
Inner diameter [mm]	59.1
Outer diameter [mm]	62.5
Thickness [mm]	1.7
Weight [kg]	6.0
Material	SUS316L

**Table 3. Dust concentration results using metal filter No. 1 for coal gasification flyash fines**

Sampling location	Inlet of filter system	Outlet of filter system
Measured dust concentration	 12,834.42 mg/Nm <sup>3</sup>	 18.14 mg/Nm <sup>3</sup>



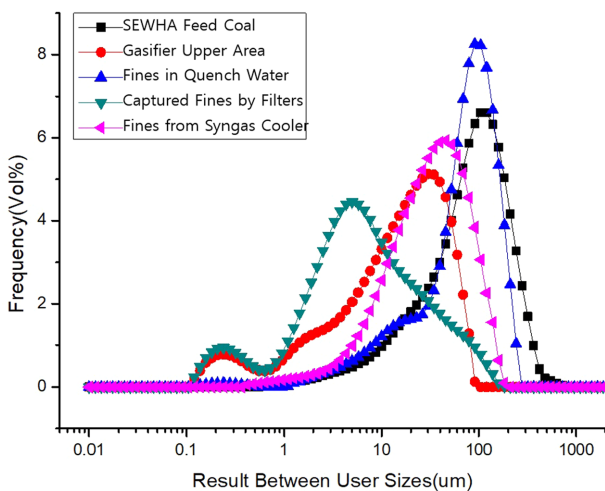
**Fig. 7. Installation of metal filters to the dust removal test facility.**

필터 무게는 약 6 kg이다. 같은 크기의 SiC 재질인 상용 세라믹필터가 약 5 kg 정도인데 반해서 1 kg 무겁다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 석탄가스화 분진을 사용한 분진제거 운전 특성과 제거효율

3톤/일급 파일롯 석탄가스화기에서 발생한 분진을 금속필터 No. 1를 통하여 집진한 결과는 Fig. 8과 같다. 이 결과는 인도네시아 세



**Fig. 8. Particle size distribution of coal feed and captured fines in 3 ton/day coal gasification test using metal filter No. 1.**

화탄을 사용하여 20 bar 석탄가스화 압력조건에서 생산한 합성가스(CO 44%, 수소 19%)가 금속집진필터를 통과하여 얻은 자료로서, 원료석탄은 1~800 μm의 넓은 범위 입자로 분포하고 있고 가스화기 상부와 금속필터 집진장치에서 포집된 입자들은 0.1~0.6 μm과 1~200 μm에 해당하는 2개의 포집된 입자분포를 보여주고 있다. 석탄가스화 실험방법과 분진에 대한 상세한 분석 방법 등은 이전 자료에 나타나 있다[6].

1,300~1,600 °C에 달하는 가스화 반응영역에 속하는 가스화기 상부에서 0.1~0.6 μm에 해당하는 입자들이 발생하였는데 이 미세먼지 크기에 해당하는 입자들은 원료 석탄에는 없던 입자크기로서 무기 물질이나 중금속 휘발성분들에 의해 생성된 것으로 판단된다. 집진 금속필터를 통하여 생성된 0.1~0.6 μm 크기의 미세분진들은 대부분 포집되는 것으로 파악된다. 일반적으로 극미세먼지인 0.1 μm 이하 입자의 질량은 매우 적고 숫자는 많아 포집물질의 질량으로 파악하는 집진효율에는 크게 영향을 주지 못한다.

시험용 집진장치 운전압력 10 bar, 시험가스 온도 300°C, 시험가스 공급량 110 Nm<sup>3</sup>/h, 그리고 필터 역세 차압 10 bar로 제어하였고, 정상상태에 도달한 후 집진장치 입구와 출구에서 각각 3회씩 분진 농도를 측정하였다. 필터 차압이 75 mmH<sub>2</sub>O에 도달한 시점에서 집진장치 입구와 출구에서 분진농도 측정을 진행하였고 그 결과를 Table 3에 요약하였다. 집진장치 입구농도는 12,834 mg/Nm<sup>3</sup>이었고 출구농도는 18 mg/Nm<sup>3</sup>로서 분진 제거효율은 99.86%이었다.

필터 역세운전을 전체 역세와 개별 역세로 구분하여 진행하면서 운전 과정에서 확인된 필터 차압특성 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 필터를 개별로 역세하는 방법으로 운전하였을 경우에는 집진장치 내부에 설치된 총 3개의 필터 중 첫 번째 필터 1차 역세 후 2차 역세하기까지 약 17분 50초가 소요되는 것으로 확인되었고, 필터 전체를 한번에 역세하는 방법으로 운전한 경우에는 첫 번째 필터 1차 역세 후 2차 역세까지 소요된 시간이 약 19분 15초인 것으로 확인되었다. 그리고 역세 후 필터 차압이 가장 낮아진 시점에서의 차압은 개별 역세 방법보다 전체 역세 방법으로 운전하였을 때가 더 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 필터 전체 역세 방법이 역세 주기가 길고 필터 최저 차압이 더 낮게 운전되기 때문에 효율적인 운전방법인 것으로 판단되었다.

금속필터 No. 2를 설치한 후 연속으로 분진을 공급하면서 필터 차압 및 분진 여과특성 확인 시험을 진행하였다. 시험용 집진장치 운전조건으로는 집진장치 운전압력 10 bar, 가스 공급량 110 Nm<sup>3</sup>/h, 운전온도 300°C, 역세 차압 10 bar이며, 필터 역세운전은 필터 차압이 300 mmH<sub>2</sub>O에 도달하면 30초 주기로 필터 전체 역세운전을 진행하였다. Fig. 10에서 보듯이 금속필터 No. 2의 역세 운전주기는 약 20분이었고 역세 후 필터 최저 차압은 약 65 mmH<sub>2</sub>O까지 낮아짐을 확인할 수 있었다. 시험이 진행되는 동안 시험용 집진장치 입구와

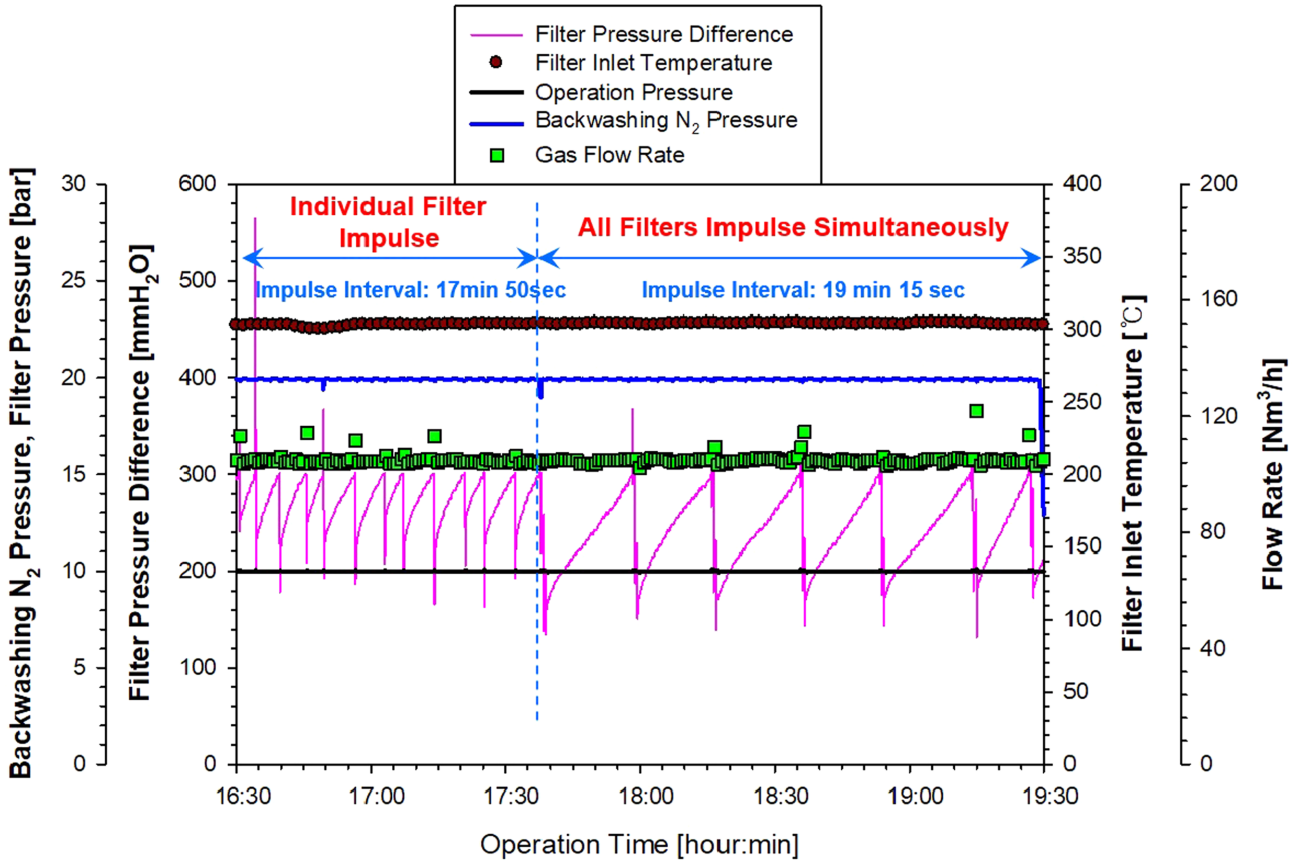


Fig. 9. Operational characteristics of differential pressure by filter-cleaning methods (metal filter No. 1).

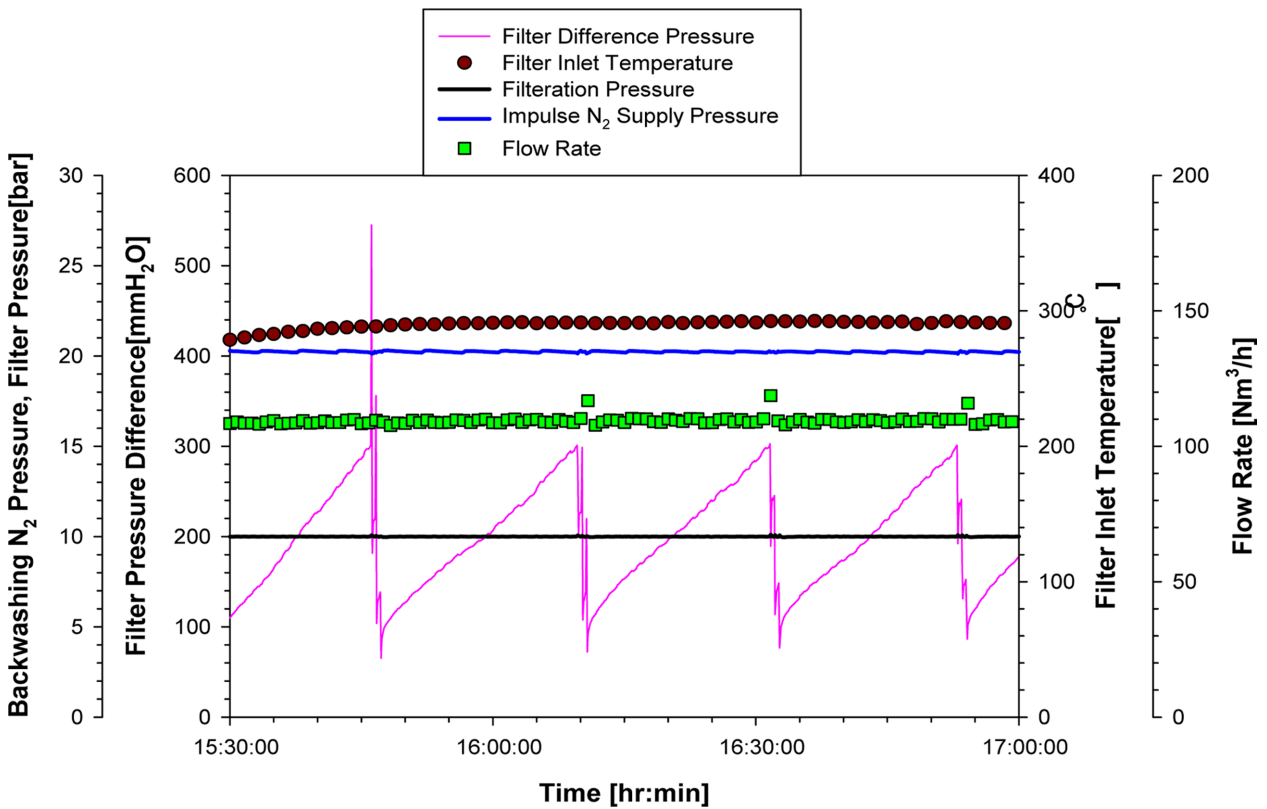




Fig. 10. Operational characteristics of differential pressure by filter-cleaning methods (metal filter No. 2).

**Table 4. Dust concentration results using metal filter No. 2 for coal gasification flyash fines**

Sampling location	Inlet of filter system	Outlet of filter system
Measured dust concentration		
	17,943 mg/Nm <sup>3</sup>	5.7 mg/Nm <sup>3</sup>

출구에서 가스에 함유된 분진농도를 측정하였는데, 시험용 집진장치 입구 분진농도는 17,943 mg/Nm<sup>3</sup>이었고 출구에서의 분진농도는 5.7 mg/Nm<sup>3</sup>이었다 (Table 4). 측정된 집진장치 전후단 분진농도를 기준으로 산출한 금속필터의 분진제거 효율은 99.96%이었다.

국내 석탄화력발전소에 대한 먼지 배출허용 기준은 2019년부터 이전의 20~25 mg/m<sup>3</sup>에서 10~12 mg/m<sup>3</sup> 수준으로 강화되었다[7]. 석탄화력발전소, LNG발전소, 소각시설 및 SRF(Solid Refuse Fuel) 발전소에 대한 국내 먼지 대기오염 배출허용기준은 Table 5와 같다. 이 기준에서 볼 때 금속필터 No. 1을 사용한 집진결과는 10 mg/Nm<sup>3</sup> 이상으로서 여과제어 스크린의 기공을 더 작게 하여 금속필터를 제작할 필요가 있음을 보여준다. 금속필터 No. 2의 경우는 금속필터 후단의 가스 내 분진농도가 10 mg/Nm<sup>3</sup> 이하인 성능을 보여주고 있다. 본 연구에 사용된 금속필터들은 5 μm 기공인 여과제어 스크린 슈트를 사용하였는데 기공이 더 작은 슈트를 사용할 필요성이 확인되었다. 이 경우 필터 전후단의 차압이 얼마나 증가하는지와 미세입자에 의한 필터 기공의 폐색 가능성도 같이 고려하여야 한다.

**3-2. 표준 분진을 사용한 분진 제거효율**

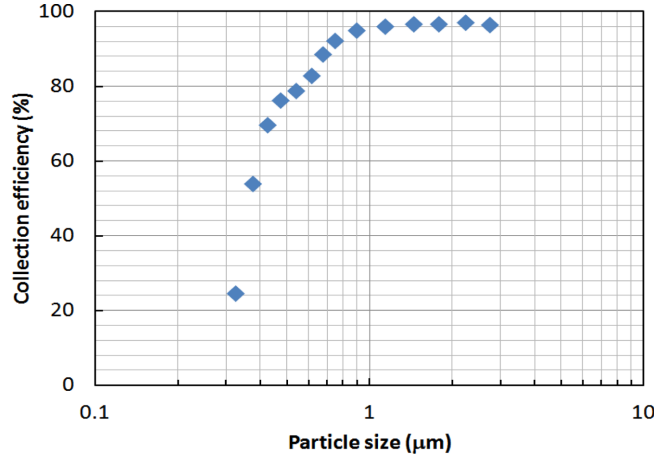
JIS 표준분진을 사용하여 실시한 실험은 시험장치 내부에 금속필터 시편을 거치한 후 장치 후단에 연결된 흡입방식의 송풍기를 이용하여 대상 분진 입자의 이송이 가능하도록 시험공기 유량 480 Nm<sup>3</sup>/h를 공급하고, 분진공급장치를 이용하여 분진을 연속적으로 공급하면서 시편 전후단에 설치된 분진입자 계수기를 통해 입자 크기에 따른 분진농도를 측정하는 방식으로 진행되었다.

Fig. 11은 금속필터 No. 1을 사용했을 때의 분진 제거효율 측정 시험 결과를 나타낸 것으로 분진 입도 0.3~0.9 μm 정도의 미세입자에 대해서는 24.5~94.8% 정도의 제거효율을 보이고 있으며 1~2.5 μm 정도의 분진에 대해서는 제거효율이 97% 정도로 측정되었다.

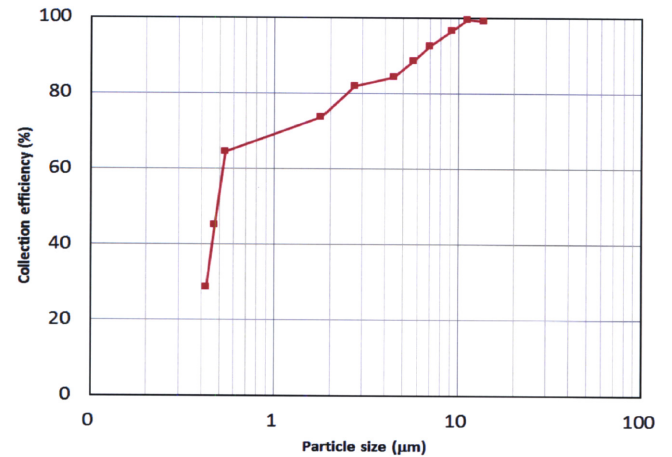
금속필터 No. 2를 사용한 분진 제거 측정 결과는 Fig. 12에서 볼 수 있다. 분진 입도 0.4~5.7 μm 크기의 입자에 대해서는 28.6~88.6% 정도의 제거효율을 가지는 것으로 파악되었으며, 1~2.5 μm 정도의 분진에 대해서는 제거효율이 70~82% 정도로 측정되었다. 11.2 μm의 입자에 대해서는 99.5%의 제거효율을 나타냄으로써, 평균 입도 20 μm 정도를 가지는 가스화플랜트 발생 비산재의 경우에는 99.7% 이상의 분진제거효율을 달성할 수 있을 것으로 예측되었다.

**Table 5. Environmental emission regulations of dust in Korea**

Plant Classification	Coal-fired power plant (New installation after 2001/07)	Coal-fired power plant (New installation after 2015)	LNG power plant (Operational before 2015)	LNG power plant (New Large Municipal Solid Waste Incinerator SRF(Soild Refuse Fuel) power plant installation after 2015)	
	Dust (mg/Nm <sup>3</sup> )	20	10	15	10



**Fig. 11. Removal efficiency of fine particulate matter using metal filter No. 1 for JIS standard fines.**



**Fig. 12. Removal efficiency of fine particulate matter using metal filter No. 2 for JIS standard fines.**

금속필터 No. 2는 금속필터 No. 1에 비해서 전체 10 μm 이상 크기인 분진 집진효율은 더 높으나, 10 μm 이하인 미세먼지와 초미세먼지 영역에서는 포집효율이 낮게 측정되었다. 따라서 금속필터 No. 2에 적용된 여과제어 스크린의 기공 크기를 더 줄여 적용할 필요가 확인되었다.

**3-3. 고온고압 공정에서 초미세먼지 대응을 위한 기술 방안**

석탄을 고온에서 사용하는 공정에서 발생하는 극미세먼지(0.1 μm 이하) 크기의 입자들은 중금속물질들이 휘발 응축을 통하여 농축될 가능성이 높으므로 특히 정밀한 집진이 요구된다. 극미세먼지는 숫자로는 매우 많지만 질량으로는 매우 적은 양이어서 집진측면에서는 포집하기 쉬운 대상은 아니다.

소결/압착 방식의 금속필터는 여과제어 스크린의 기공 크기와 공

극률을 조절함으로써 대상 분진의 집진에 대응할 수 있다. 본 연구에서는 5  $\mu\text{m}$  기공 크기인 여과제어 스크린을 사용하여 미세먼지 영역까지 분진 포집이 효과적일 수 있는 가능성을 확인하였다. 극미세먼지 영역까지 집진을 위해서는 여과제어 스크린만으로는 한계가 예상되므로 세라믹 필터에 적용되는 표면 코팅기술의 적용도 고려될 수 있다. 다만, 이 경우 필터 집진시스템의 차압이 크게 증가하고 필터 기공이 극미세먼지나 응축물들로 폐색될 가능성도 커지므로 이에 대응한 기술개발이 요구된다.

현재 산업계에서 사용하고 있는 분진제거 기술과 설비들은 극미세먼지를 염두에 두고 개발된 것들이 아니고 상대적으로 큰 크기인 분진을 제거하는데 중점이 주어져 왔다. 최근에 관심이 높아진 미세먼지와 극미세먼지에 대응하기 위해서는 여러 기술들이 제시되고 있는데, 금속필터는 내부식 성능을 향상시키기 위한 표면 코팅기술이 가장 현실적으로 판단된다. 백필터는 고온에 견디는 재질의 개발과 차압을 극복할 방안이 큰 요소이며, 전기집진기는 기존 코로나 방전 방식에 부분적 X선 활용 등 기술이 개발되고 있기도 하다[8,9].

#### 4. 결 론

석탄가스화 설비와 같이 고온고압 조건에서 운영되는 플랜트에서 분진을 효과적으로 포집하기 위한 5중 압착 금속필터 2종을 제작하여 분진포집 성능과 운전특성을 조사하였다. 총먼지에 대한 제거 효율은 300 °C 집진 온도에서 금속필터를 사용하여 99.86%, 99.96%를 얻었다. 금속필터 No. 1을 사용한 집진 후 합성가스에 포함된 분진농도는 18 mg/Nm<sup>3</sup>으로서 필터의 기공 크기를 더 작게 하여 금속필터를 제작할 필요가 있음을 보여준다. 금속필터 No. 2의 경우는 금속필터 후단의 가스 내 분진농도가 10 mg/Nm<sup>3</sup> 이하인 성능을 보여주었다. 국내 석탄화력발전소에 대한 먼지 배출허용 기준이 2019년부터 10~12 mg/m<sup>3</sup> 수준으로 강화되는데 이에 대응하기 위하여는 여과제어 스크린 금속쉬트의 기공크기를 더 작게 하여 대응할 필요성이 확인되었다.

1,300~1,600 °C에 달하는 고온 가스화 반응영역에서 0.1~0.6  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 입자들이 발생하는데 이 미세먼지 크기에 해당하는 입자들은 제거하기 위한 실험을 수행하였다. 금속필터 No. 1을 사용했을 때 0.3~0.9  $\mu\text{m}$  정도의 미세입자에 대해서는 24.5~94.8% 정도의 제거효율을 보였으며 1~2.5  $\mu\text{m}$  크기의 분진에 대해서 제거효율이

97% 정도로 측정되었다. 금속필터 No. 2를 사용하였을 때는 0.4~5.7  $\mu\text{m}$  크기의 입자에 28.6~88.6% 정도의 제거효율을 가지는 것으로 파악되었지만, 11.2  $\mu\text{m}$  크기의 입자에 대해서는 99.5%의 제거효율을 나타냄으로써, 평균 입도 20  $\mu\text{m}$  정도를 가지는 가스화플랜트 발생 비산재의 경우에는 99.7% 이상의 분진제거효율을 달성할 수 있을 것으로 예측되었다.

금속필터는 세라믹필터 대비 차압 측면에서 유리하고 부식 등 재료측면의 보완이 완성된다면 미세먼지만이 아니라 초미세먼지 및 극미세먼지 영역까지도 집진에 효과적인 대응이 가능하다고 사료된다.

#### References

1. Helble, J. J. and Sarofim, A. F., "Factors Determining the Primary Particle Size of Flame Generated Inorganic Aerosols," *J. Colloid Interface Sci.*, **128**, 348-362(1989).
2. Li, Y., Suriyawong, A., Daukoru, M., Zhuang, Y. and Biswas, P., "Measurement and Capture of Fine and Ultrafine Particles from a Pilot-Scale Pulverized Coal Combustor with an Electrostatic Precipitator," *J. of the Air & Management Association*, **59**, 553-559(2009).
3. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/91068.pdf>.
4. Jones, A. M. and Harrison, R. M., "Emission of Ultrafine Particles from the Incineration of Municipal Solid Waste: A Review," *Atmospheric Environment*, **140**, 519-528(2016).
5. Zevenhoven, R. and Kilpinen, P., Control of Pollutants in Flue Gases and Fuel Gases, 3<sup>rd</sup> ed., Chapter 5. Particles, Espoo/Turku, Finland(2004).
6. Yun, Y. and Yoo, Y. D., "Performance of a Pilot-Scale Gasifier for Indonesian Baiduri Coal," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(5), 679-685(2001).
7. Maximum Two Times Tightening in Max Allowable Limit of Fine Particulate for Big Emitting Facilities, Press Release by Korea Ministry of Environment (2018).
8. Jing, H., "Novel Applications of Electrostatic Precipitators in Coal - Biomass Combustion Systems," Ph.D. thesis, Washington University(2015).
9. "High Sensitivity Device for Trapping Aerosolized Nanoparticles and Purifying Air," Scaffold Public Documents-Ref.: Scaffold SPD26(2014).