

석탄 화력 보일러에서의 응집제 이용에 따른 초미세먼지 거동

류환우[†] · 송병호

군산대학교 화학공학과
(2019년 10월 21일 접수, 2019년 11월 7일 심사, 2020년 1월 8일 채택)

Effect of Coagulants on the Behavior of Ultra Fine Dust in a Coal Firing Boiler

Hwanwoo Ryu[†] and Byungho Song

Department of Chemical Engineering, Kunsan National University, Gunsan, Jeonbuk 54150, Republic of Korea
(Received October 21, 2019; Revised November 7, 2019; Accepted January 8, 2020)

초 록

초미세먼지로 분류되는 PM_{2.5} (particulate matter under 2.5 μm) 중에서도 특히 sub-micron 입자(0.1~1.0 μm)의 먼지는 브라운 운동(Brownian motion)으로 집진장치의 효율에 한계를 준다. 따라서 수산화나트륨으로 활성화된 알루미늄산나트륨(NaAlO₂)을 응집제(coagulant)로 선택하여 석탄을 사용하는 유동층 보일러에서 석탄의 회분에 포함된 칼륨(K)과 PM_{2.5}의 입도분포의 거동과 영향을 확인하고자 했다. 그리고 응집제를 석탄의 무게대비 1,200 : 1 비율로 석탄에 혼합 및 분사하면서 정상 운전하는 중에 보일러의 사이클론에서의 미세먼지(FP)와 전기집진기에서의 미세먼지(EP)를 포집 및 고찰하였다. 포집한 미세먼지를 입도분석기를 이용하여 입도분포(%)를 분석한 결과 FP에서 평균 4.87%에서 0.51%로 변화를 보임으로써 89.53% 감소하였다. EP에서의 평균 3.46%에서 0.40%로 변화를 보임으로써 88.57% 감소하였다. 포집한 미세먼지를 XRP로 칼륨을 추적한 결과 칼륨의 변화율은 FP에서 평균 1.65%에서 1.87%로 13.33% 증가하고, EP에서 평균 1.65%에서 2.03%로 17.68% 증가하였다. TMS에 의해서 확인된 총 미세먼지 농도(mg/m³)는 1차는 2.6 mg/m³에서 1.7~1.9 mg/m³로 26.9~34.6% 감소하였으며, 2차는 평균 2.9 mg/m³에서 1.7~1.9 mg/m³로 33.3~40.4%가 감소하였다. 따라서 본 연구의 응집제가 PM_{2.5} 초미세먼지 입자의 크기와 그로 인한 집진장치효율에 크게 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

Abstract

Particulate matters of PM_{2.5}, particularly focusing on 0.1~1 μm decrease the efficiency of dust-collector due to the brownian-motion. This study is to verify the effect of coagulant on the particle size distributions of potassium and PM_{2.5}. The activated coagulant was sprayed to the coal fired fluidized bed combustion boiler by the weight ratio of 1,200 : 1 = coal : coagulant, and the size distributions of captured particles at both the cyclone (FP) and electrostatic precipitator (EP) were measured. As the result of XRP analysis, the potassium content of FP increased to 13.33% (averagely from 1.65% to 1.87%) and, in EP at 17.68% (averagely from 1.65% to 2.03%). And it was confirmed by the particle size distribution analyzer and SEM image analysis that the distribution rates of PM_{2.5} decreased at 89.53% on average in FP, and at 88.57% in EP. The total dust concentration (mg/m³) confirmed by tele-monitoring system (TMS) decreased during the primary test from 2.6 to 1.7~1.9 and also the secondary test from 2.9 to 1.7~1.9 .

Keywords: PM_{2.5}, Ultra fine dust, Coagulant, Dust collector, Activated sodium aluminate

1. 서 론

석탄을 연료로 하는 보일러의 연소 시 연소 가스와 함께 발생하는 다양한 크기의 미세먼지는 회분(ash)의 형성과정 ‘pyrolysis and fragmentation → vaporization and char formation → nucleation → coagu-

lation’에서 발생하며 석탄에 포함된 알루미늄, 규소, 철, 알카리 토금속, 알카리 금속 등과 같은 대표적인 mineral 원소들은 미연탄소들과 함께 흡착과 응집을 통해 초미세먼지의 구성 물질을 이룬다[1,2].

초미세먼지는 크기가 매우 작아 공기 및 연소 가스 속 입자와 충돌하여 불규칙한 운동을 하게 되는데 이를 브라운 운동(brownian motion)이라하며 초미세먼지인 PM_{2.5} (particulate matter under 2.5 μm) 중에서 특히 sub-micron 입자(0.1~1.0 μm)는 확산에서 충돌 영역으로 전이하는 과정에 존재하며 0.1~1.0 μm 구간의 미세먼지는 브라운 운동의 간섭을 받아 집진장치의 효율을 감소시키면서 배출된다[3].

칼륨과 같은 원소를 많이 포함하고 있는 wood-chip과 같은 바이오

[†] Corresponding Author: Kunsan National University,
Department of Chemical Engineering, Gunsan, Jeonbuk 54150, Republic of Korea
Tel: +82-63-835-3367 e-mail: rhssm@sootfree.co.kr

매스를 연료로 사용하는 연소로에서 응집제로 사용되는 카오린(kao-linite)은 알루미늄화합물로 clay mineral로 구성된 점토 광물이다. 화학식은 광물학적으로는 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 이고 재료공학적으로는 $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ 이다. 카오린은 고온으로 운전 중인 연소로에서 칼륨 등의 흡착 및 응집 속성이 연구된 바가 있으며 잠재적인 흡착 및 응집제로 인정받고 있다. 특히 탈수된 메타카오린(metakaolin)은 고온에서 폐기물에 포함된 납의 흡착 및 응집제로도 연구 및 발표되고 있고, 알칼리 수용액으로 활성화된 metakaolin-geopolymer는 바이오매스의 고온 연소에서 칼륨과 같은 미세입자의 우수한 흡착 및 응집제로 연구 및 발표되고 있으며, 메타카오린의 이 같은 흡착 및 응집하는 원인으로 카오린이 가지고 있는 알루미늄의 구조적 특성으로 밝혀지고 있다. 메타카오린은 카오린이 550~600 °C에서 탈수되기 시작하여 800 °C까지 탈수되면서 생성되는 비결정체이며 반응식은 $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow Al_2Si_2O_7 + 2H_2O$ 과 같다[4,5].

또 다른 알루미늄 응집제 알루미늄산나트륨[$NaAl(OH)_4$]은 용융점이 1,650 °C로 높으면서도 알칼리 수용액에 쉽게 용해되어 고온에서 응집제로 적절하며, 가열되면 반응식 " $NaAl(OH)_4 \rightarrow NaAlO_2 + 2H_2O$ "의해 물 분자가 이탈하고 $NaAlO_2$ 가 된다[6,7].

따라서 본 연구는 알칼리로 활성화된 알루미늄산나트륨을 미세먼지의 응집제로 선정하고, 석탄을 사용하여 고온으로 운전 중인 보일러에서 적용 및 시험하여 미세먼지를 포집한 다음에 TEM, XRF, 그리고 입도분석기와 SEM을 이용하여 응집제가 sub micron을 포함한 PM_{2.5}의 입자분포와 칼륨 그리고 그로 인한 집진장치의 효율에 어떤 영향을 주는지를 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 응집제 제조

알루미늄산나트륨($NaAlO_2$, 대명케미칼) 5 g, 알칼리 수용액인 수산화나트륨($NaOH$ 25% 용액, 한솔케미칼) 25 g, 그리고 borax (터키 산) 0.5 g을 물 70 g의 비율로 완전히 용해시키면서 혼합하여 응집제를 만들었다.

2.2. 실험조건

실험을 위해 Tables 1과 2에 요약한 특성을 가진 석탄을 사용하는 유동층 보일러를 선정하였다. 보일러의 연소방식은 순환유동층, 증기 압력과 온도는 60 kg/cm², 484 °C, 증기 발생량은 60 ton/h, 전력 용량은 9.2 MWh, 석탄 종류 및 사용량은 중국 석화탄 9.0 ton/h, 로내 온도 800~850 °C이다. Figure 1은 보일러 설비의 공정개요를 나타내며, 응집제는 coal + additive (검은 화살표)의 위치에서 석탄과 함께 800~850 °C 고온으로 운전 중인 보일러 내에 투입된다. 선정된 보일러는 가장 전형적인 순환유동층 형식으로 유연탄을 주요 연료로 사용한다. 보일러의 주요구성은 비산 회분의 포집과 회분의 순환을 위한 사이클론, 대류전열부의 과열증기관, 절탄기(보일러수의 예열), 공기예열기, 연소 배기가스 중 미세먼지 제거를 위한 전기집진기이며, 굴뚝(stack) 전단에 SO₂ 제거를 위한 습식 FGD (flue gas de-sulfuration)와 TMS (tele-monitoring system: OMD 41 Dust Analyzer, USA)를 갖추고 있어 응집제의 효과를 관찰하기에는 적절한 조건을 가지고 있다.

2.3. 응집제 적용과 미세먼지 포집방법

Table 3과 같은 보일러 운전조건에서 응집제를 첨가하기 전 3 day 간 동일한 부하로 보일러를 정상적으로 운전하면서 포집 및 샘플링하

Table 1. Proximate Analysis and Ultimate Analysis

Item	Unit	Contents
Proximate analysis (dry basis)		
Moisture	w%	12.34
Ash	w%	9.05
Volatile	w%	28.30
Fixed carbon	w%	50.31
Ultimate analysis (dry basis)		
Carbon	w%	71.87
Hydrogen	w%	4.15
Nitrogen	w%	3.09
Sulfur	w%	0.24
Ash (minerals)	w%	9.05
Oxygen	w%	11.60
Calorific value (dry basis)	kcal/kg	6,990
Calorific value (as received)	kcal/kg	6,690

* The condition of calorific analysis is based on the arrival.

Table 2. Ash Analysis

	SiO ₂	w%	44.10	Remark
	Al ₂ O ₃	w%	16.41	
	Fe ₂ O ₃	w%	12.52	
	Na ₂ O	w%	0.21	
Sunwha coal (mineral oxide)	K ₂ O	w%	0.95	Measurement method : KS L 5405 : 1997
	TiO ₂	w%	0.57	
	CaO	w%	4.84	
	MgO	w%	0.88	
	SO ₃	w%	1.29	

였으며, 응집제를 첨가하고 보일러를 정상적으로 운전하면서 포집 및 샘플링하였다. 보일러가 운전 중에 석탄을 연소로에 공급하기 위한 conveyor가 작동하면, 이송되고 있는 석탄의 표면에 응집제를 석탄 무게(kg)를 기준으로 '연료 : 응집제 = 1,200 : 1'의 비율로 sampling 3 day 전부터 매일 24 h 투입하였다.

응집제에 의한 미세먼지의 입도변화에 대한 효과 검증을 위하여 두 가지 위치 및 먼지에 대해 측정하였다. 하나는 사이클론 후단에서 미세입자를 포집하여 분석하는 방법(fine particle: FP)으로 후술하는 방법으로 미세먼지 포집장치를 통해 30 min간씩 연속적으로 16회 포집한 sample을 혼합 및 균질화하였으며, 또 하나는 전기집진기의 회분(ash)을 30 min간씩 16회 샘플링하여 혼합 및 균질화하여 미세먼지의 입자크기를 분석하는 방법(EP particle: EP)이다.

Figure 2는 사이클론 후단에서 미세먼지를 포집하는 장치 및 방법을 나타낸다. 사이클론 후단에서 미세먼지 포집 과정 중 모든 계통 내에 부착되어 있는 이물질 및 미세먼지 등을 제거하기 위하여 공정 중의 압축공기를 분무하여 청소하였고, 모든 공정에 leak 없이 연결되었는지를 확인하고, filter kit에 finger type 필터를 조립하고 진공 펌프를 작동시켜 배기가스를 흡입하는 공정으로 구성하였다. 압력계와 유량계를 통해 배기가스의 흡입상태를 점검하고, filter kit에 부착된 온도계를 통해 유입되는 배기가스 온도를 확인하고, 배기가스가 계속적으

Table 3. Operating Conditions and TMS Dust Concentration (mg/m³)

Item	Collected date		
	No coagulant	Coagulant	
Load, %	87.5	87.5	
Mixing ratio of fuel & additive	No add	1,200 : 1	
Bed temp. °C	780	780	
Freeboard temp. °C	812	820	
Cyclone temp. °C	863	887	
TMS	O ₂ , %	3.7~4.3	3.7~4.3
	NO _x , ppm	67.7	38-55
	SO ₂ , ppm	52	38.3

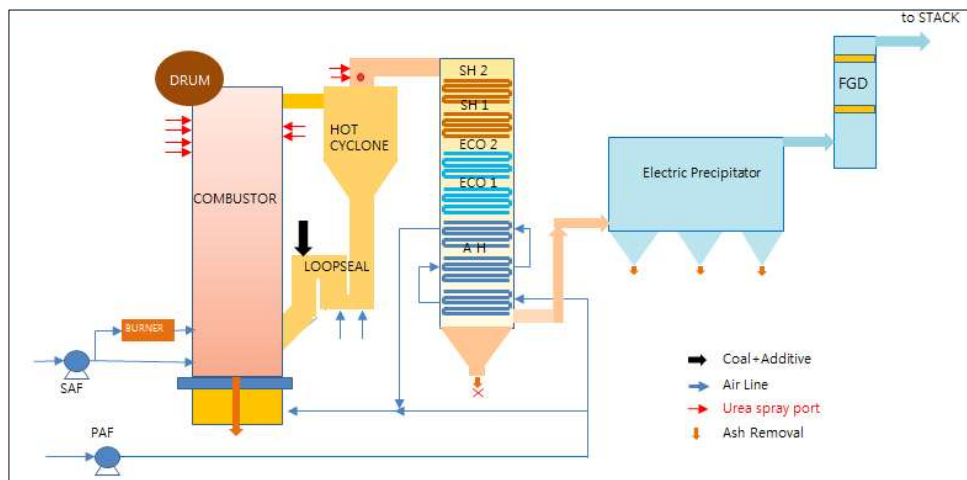


Figure 1. Facility process of coal-fired fluidized bed boiler.

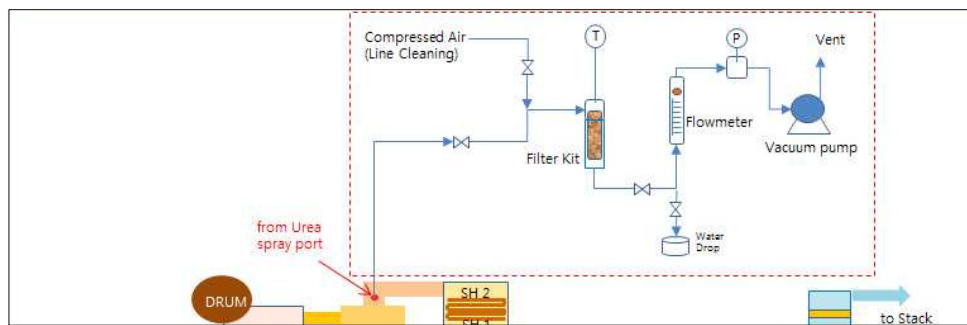


Figure 2. Schematic diagram of FP particle collecting process.

로 흡입되면 약 270 ± 50 °C 이상을 유지할 수 있도록 하고, 또 필터를 통과한 배기가스가 응축될 경우 응축수를 제거할 수 있도록 공정을 구성했다. 배기가스와 미세먼지를 함께 흡입 후 미세먼지들은 매 30 min씩 finger filter에서 포집하고 배기가스만 유량계와 진공 펌프를 통해 대기 중으로 배출하였다. EP는 전기집진기에서 회분(ash)를 샘플링하여 회분 내 미세먼지를 분석하였다.

더불어 Table 1과 같은 조건으로 운전하면서 집진기 후단의 굴뚝에 설치된 먼지분석기는 auto collimation (이중축정경로, 고감도)의 측정 광원을 채택한 다중분할방식(TDM)으로 작동하며 extinction 값을 미세먼지 농도를 질량(mass) 단위로 변환하여 나타냄으로 이를 이용하여 미세먼지 농도(dust concentration, mg/m³)를 30 min간씩 16회 실시

간으로 monitoring하여 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집체의 다공성 확인

본 실험에서 사용한 응집체를 상온에서 수분을 제거하고 가열하지 않은 응집체 (a)와 상온에서 수분을 제거하고 로에서 800 °C로 고온 소성한 응집체 (b)의 미세구조의 차이를 nanometer 단위로 관찰하기 위하여 transmission electron microscope (Talos-F-200-X, ETH, Swiss)을 이용하여 표면 상태의 이미지를 분석하였다. 첫 번째 가열하지 않은 응집체는 Figure 3(a)와 같이 다공성이 낮으나, 가열한 응집체는 Figure

Table 4. Analysis of Particle-size Distribution (%) of FP & EP

Content		Sampling	Mean dia. (μm)	Minimum dia. (μm)	PM _{2.5}	PM ₁₀
No coagulant	1st	FP	39.76	1.50	4.46	21.68
		EP	32.21	1.50	4.44	26.99
	2nd	FP	19.42	1.50	5.28	42.07
		EP	35.91	1.78	2.47	23.98
	Average	FP	29.59	1.50	4.87	31.88
		EP	34.06	1.64	3.46	25.49
Coagulant	1st	FP	39.66	2.12	0.83	21.07
		EP	48.01	2.12	0.63	14.97
	2nd	FP	27.23	2.52	0.19	18.76
		EP	44.06	2.52	0.16	14.77
	Average	FP	33.45	2.32	0.51	19.92
		EP	46.04	2.32	0.40	14.87
Improvement	FP	13.03	54.87	-89.53	-37.52	
	EP	35.16	41.47	-88.57	-41.65	

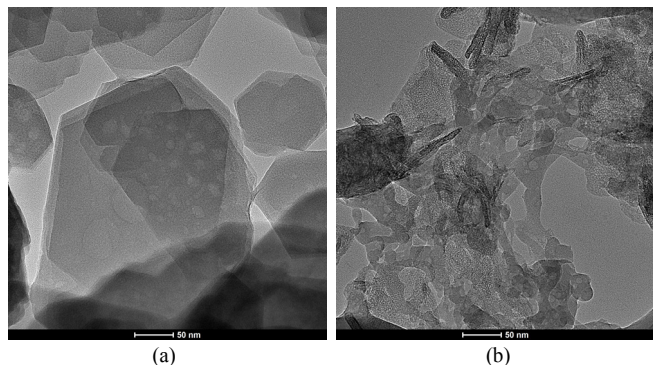


Figure 3. Coagulant image of no heating (a) and coagulant image of heating (b).

3(b)와 같이 다공성이 높은 물질로 변화되었다. 따라서 알카리 수용액에 용해된 응집제가 고온으로 가열되면 다공성으로 활성화되고 이로 인해 초미세먼지의 흡착 및 응집에도 다소 기여할 것으로 추정된다.

3.2. 응집제의 PM_{2.5} 분포도에 대한 영향

사이클론 후단에서 포집된 미세먼지(FP)와 전기집진장치에서 포집된 미세먼지(EP)를 입도분석기(S-3500, Microtrac Inc., USA)를 이용하여 입도분포(%)를 분석하여 Table 4에 나타냈다. 이들은 응집제를 첨가하지 아니한 것과 첨가한 것, 그리고 포집한 위치(FP, EP)를 구분하여 미세먼지의 평균입도분포(Mean dia.), 최소입자분포(Minimum dia.), PM_{2.5} 입도분포, PM₁₀ 입도분포를 분석한 것으로 이들에 대한 분포율(%) 계산은 아래 식(1)과 같다.

$$De = \left[\frac{CR_{coal} + CR_{coal+add}}{CR_{coal}} \right] \times 100 \quad (1)$$

De : 저감율

CR_{coal} : 석탄만 연소 시 배출분율

CR_{coal+add} : 응집제(additive) 주입 시 배출분율

응집제의 영향을 확인하기 위해 PM_{2.5} (particulate matter under 2.5 μm)를 살펴보면 FP에서 분포율은 coagulant가 없는 경우 1차 4.46%, 2차 5.28%, 평균 4.87%였으며, coagulant가 있는 경우 1차 0.83%, 2차 0.19%, 평균 0.51% 감소함으로써 89.53% 감소하였다. EP에서의 분포율은 coagulant가 없는 경우 1차 4.44%, 2차 2.47%, 평균 3.46%였으며, coagulant가 있는 경우 1차 0.63%, 2차 0.16%, 평균 0.40% 감소함으로써 평균 88.57% 감소하였다.

석탄의 연소에 따른 미세먼지 PM_{2.5}는 PM₁₀보다도 알카리 금속을 포함한 illite같은 clays를 많이 함유하고 있다[8]. 알카리 금속(K, Na)과 유사한 특성을 가지는 알카리 토금속(Mg, Ca)는 석탄 회분의 원소 중에서 약 50 w% 이상의 구성을 이루는 규소와 알루미늄을 가지고 있는 카오린 같은 구조에 ‘Si-Mg-Al’와 ‘Si-Ca-Al’를 형성하여 미세먼지의 표면을 약화시킴으로써 미세먼지의 입자를 크게 한다[9]. 따라서 본 연구에서의 응집제는 알카리 토금속보다도 quartz 등의 녹는점에 크게 영향을 주는 나트륨으로 활성화된 것으로 미세먼지 표면에 ‘Si-Na-Al’를 형성하여 미세먼지의 입자를 크게 하였다고 추정할 수 있다[10].

Figure 4는 FP의 미세먼지의 입도분포를 그래프로 나타낸 것이다. 석탄만을 연소할 경우 미세먼지 그래프 (a)와 (b)에는 1~10 μm 입자가 많이 분포되어 있으나 응집제를 주입할 경우의 미세먼지 그래프 (c)와 (d)에서는 1~10 μm 입자가 많이 줄어들었음을 확인할 수 있고, 특히 석탄만 연소할 경우 PM_{2.5}인 2.5 μm 이하가 약 3% 분포되어 있으나 석탄과 응집제를 같이 연소할 경우 PM_{2.5}인 2.5 μm 이하가 0% 분포되어 있어 Table 4의 데이터를 잘 설명해주고 있다.

더불어 미세먼지의 입자크기 변화를 SEM (scanning electron microscope, Nova NANO-SEM-450, FEI, Swiss)의 이미지 분석을 사용하여 고찰하였다. Figure 5에 사이클론 후단에서 포집한 미세먼지(FP)의 표면 상태와 이미지의 변화를 나타냈다. 응집제를 주입하지 아니한 경우의 이미지 (a)와 (b)에는 2.5 μm 이하의 미세 입자의 면적이 크게 분포되어 있으나, 응집제를 주입한 경우의 이미지 (c)와 (d)에서는 2.5 μm 이하의 미세먼지(PM_{2.5})는 줄어들고 10 μm 이상 미세먼지(PM₁₀)으로 증가하였고, 특히 sub micron을 포함한 작은 미세입자가 응집되어 큰 입자를 이루고 작은 입자가 연속적으로 큰 입자에 부착되어 있음을 확인할 수 있으며 이 같은 현상은 응집제가 가지고 있는

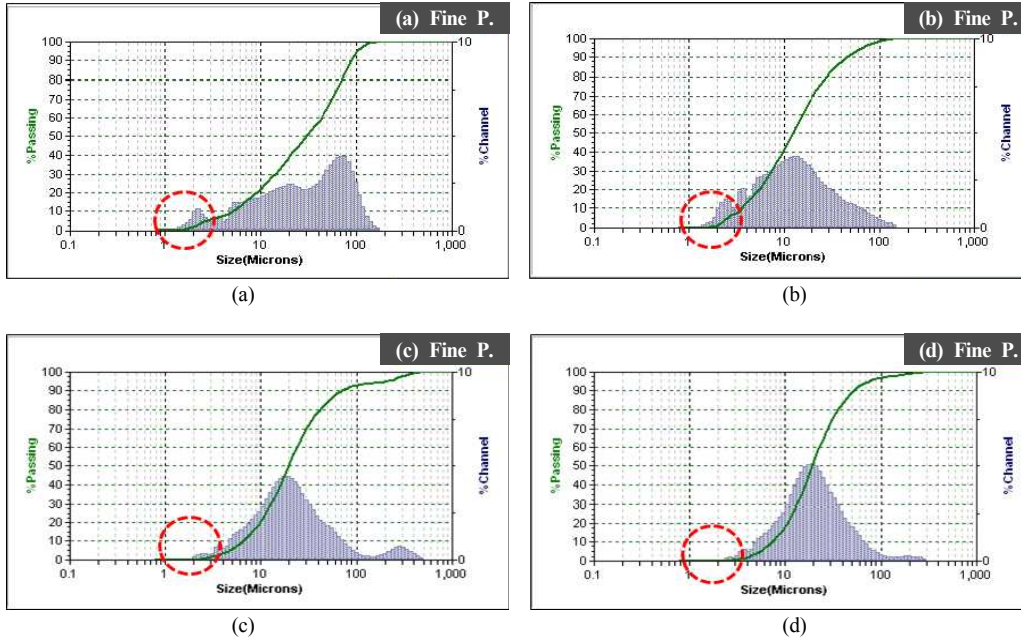


Figure 4. Analysis result of distribution (%) of FP particle.

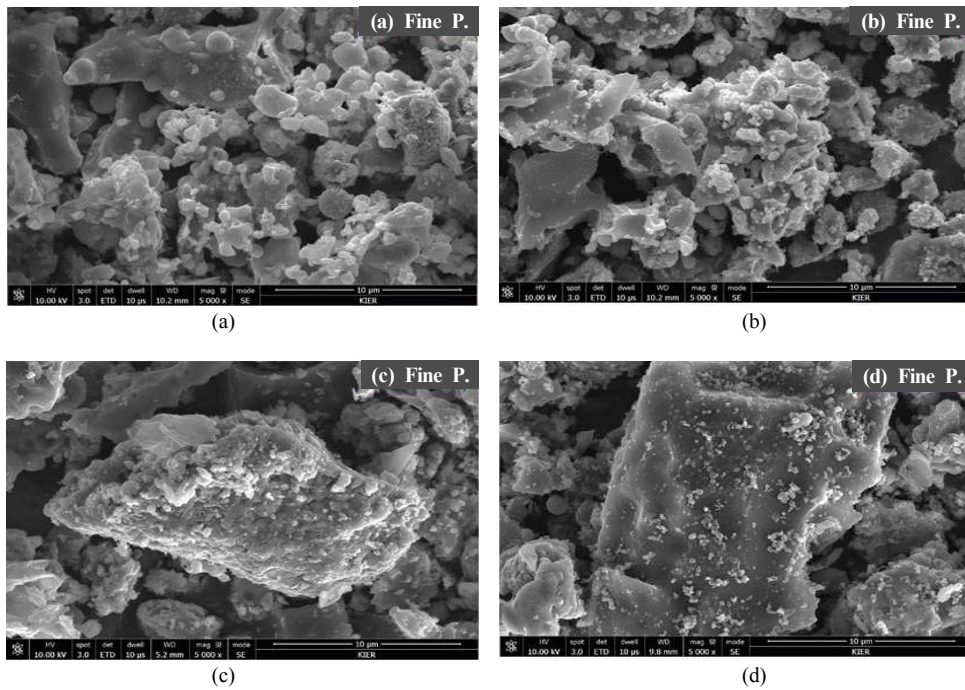


Figure 5. Image analysis of FP particle.

알카리(Na)로 인해 미세입자의 표면의 quarters 등 구조가 약해져서 점성이 형성되면서[10], 흡착 및 응집된 것으로 추정되며 이 또한 Table 4의 데이터를 뒷받침하고 있다.

3.3. 응집제의 칼륨에 대한 영향

Table 5는 XRF 분석으로 포집한 미세먼지에서 응집제의 구성 미네랄 Al, Na 외에 흡착이 기대되는 칼륨(K)를 추적하여 미세먼지 중의 w%의 분포 및 변화율(%)을 나타냈다. 칼륨의 변화율은 FP에서 coagulant가 없는 경우 1.65%에서, coagulant가 있는 경우 1차 1.79%, 2차

1.96%, 평균 1.87%로 13.33% 증가하였다. EP에서 coagulant가 없는 경우 1.65%에서, coagulant가 있는 경우 1차 1.93%, 2차 2.12%, 평균 2.03%로 17.68% 증가하였다. 이 같은 현상은 미세먼지 PM_{2.5}가 PM₁₀으로 성장하면서 나타난 것으로 보이며 메타카오린의 알루미늄 특성이 알루미늄산나트륨에 다소 존재하는 것으로 추정된다.

3.4. 응집제의 집진장치 효율에 대한 영향

집진장치에서 집진되지 못한 미세먼지는 액상 탈황장치인 습식 FGD에서도 2차로 제거되는 것으로 알려져 있으나 브라운 운동의 간

Table 5. Changed Rate (%) of Potassium (w%) after Adding Coagulant

Element	No coagulant		Coagulant						Increased rate (%)	
			1st		2nd		Average			
	FP	EP	FP	EP	FP	EP	FP	EP	FP	EP
Na	0.52	0.52	0.57	0.59	0.61	0.58	0.59	0.59	14.25	13.98
Al	10.16	10.42	10.89	11.32	11.08	11.46	10.99	11.39	8.13	9.35
K	1.65	1.72	1.79	1.93	1.96	2.12	1.87	2.03	13.33	17.68

Table 6. TMS Total Dust Concentration (mg/m³)

	No coagulant	Coagulant	Decreased rate (%)
1st	2.6	1.7~1.9	26.9~34.6
2nd	3.1	1.7~1.9	38.7~45.2
Average	2.9	1.7~1.9	33.3~40.4

접으로 인해 sub-micron (0.1~1.0 μm) 크기 미세먼지의 일부(약 25%)만 제거되고 나머지는 굴뚝을 통하여 배출된다[11,12]. 따라서 TMS에 의해서 확인된 집진장치와 FGD의 후단에 있는 굴뚝에서의 총 미세먼지 농도(dust concentration, mg/m^3)를 고찰해보면 Table 6과 같이 1차에는 coagulant가 없는 경우 2.6 mg/m^3 에서, coagulant가 있는 경우 1.7~1.9 mg/m^3 로 26.9~34.6% 감소하였으며, 2차에는 coagulant가 없는 경우 3.1 mg/m^3 에서, coagulant가 있는 경우 1.7~1.9 mg/m^3 로 38.7~45.2% 감소함으로써, 평균하여 coagulant가 있는 경우에는 2.9 mg/m^3 이었고 coagulant가 있는 경우에는 1.7~1.9 mg/m^3 로 33.3~40.4%가 감소하였다.

이 수치는 모든 크기의 미세먼지 농도를 질량단위로 나타내는 것으로 응집제에 의하여 sub micron 먼지를 포함한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 감소로 집진장치의 효율이 개선된 결과로 추정되며 이 같은 수치는 미세먼지 입도 분석 결과인 Table 4의 결과와 상관이 있다고 추정된다.

4. 결 론

수산화나트륨에 용해된 알루미늄산화나트륨을 800 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하여 TEM으로 다공성으로 활성화됨을 확인하고, 이를 응집제로 석탄을 사용하여 고온으로 운전 중인 유동층 보일러에 분사 및 투입하고 포집하여 입도분석기와 SEM을 이용하여 분석 관찰한 결과, $\text{PM}_{2.5}$ (particulate matter under 2.5 μm) 분포율은 FP에서 무첨가의 경우 1차 4.46%, 2차 5.28%, 평균 4.87%였으며, 첨가의 경우 1차 0.83%, 2차 0.19%, 평균 0.51% 감소함으로써 89.53% 감소하였다. EP에서 무첨가의 경우 1차 4.44%, 2차 2.47%, 평균 3.46%였으며, 첨가의 경우 1차 0.63%, 2차 0.16%, 평균 0.40%로 88.57% 감소하였다.

포집한 미세먼지를 XRP로 칼륨을 추적한 결과 칼륨의 변화율은 FP에서 1.65%에서 1차 1.79%, 2차 1.96% 평균 1.87%로 13.33% 증가하고, EP에서 1.65%에서 1차 1.93%, 2차 2.12%, 평균 2.03%로 17.68% 증가하였다.

TMS에 의해서 확인된 총 미세먼지 농도(mg/m^3)는 1차에는 2.6 mg/m^3 에서 1.7~1.9 mg/m^3 로 26.9~34.6% 감소하였으며, 2차에는 3.1 mg/m^3 에서 1.7~1.9 mg/m^3 로 38.7~45.2% 감소하여 평균 2.9 mg/m^3 에서 1.7~1.9 mg/m^3 로 33.3~40.4%가 감소하였다.

따라서 본 연구의 응집제가 집진장치에 한계를 주는 sub-micron 입

자를 포함하는 $\text{PM}_{2.5}$ 초미세먼지 입자와 그로 인한 집진장치효율에 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

감 사

본 연구를 위해 지도 및 도움을 주신 분들에게 감사드립니다.

References

- H. Yi, X. Guo, J. Hao, L. Duan, and X. Li, Characteristics of inhalable particulate matter concentration and size distribution from power plants in China, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **56**(9), 1243-1251 (2006).
- A. S. Damle, D. S. Ensor, and M. B. Ranade, Coal combustion aerosol formation mechanisms, *Sci. Tech.*, **1**(1), 119-133 (1981).
- A. M. Jones and R. M. Harrison, Emission of ultrafine particles from the incineration of municipal solid waste, *Atmos. Environ.*, **140**, 519-528 (2016).
- X. Wang, M. Chen, C. Liu, C. Bu, J. Z. C. Zhao, and Y. Huang, Typical gaseous semi-volatile metals adsorption by meta-kaolinite, *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, **15**(10), 2154 (2018).
- M. Bellotto, A. Gualtieri, G. Artioli, and S. M. Clark, Kinetic study of the kaolinite-mullite reaction sequence. Part I : Kaolinit dehydroxylation, *Phys. Chem. Miner.*, **22**(4), 207-217 (1995).
- R. J. Moolenaar, J. C. Evans, and L. D. McKeever, Structure of the aluminate ion in solutions at high pH, *J. Phys. Chem.*, **74**(20), 3629-3636 (1970).
- K. A. James and P. Shiyu, The crystal structure of hydrated sodium aluminate, $\text{NaAlO}_2 \cdot 5/4\text{H}_2\text{O}$, and its dehydration product, *Solid State Chem.*, **115**(1), 126-139 (1995).
- J. S. Lighty, J. M. Veranth, and A. F. Sarofim, Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **50**(9), 1565-1618 (2000).
- Y. Ninomiya, Q. Wang, S. Xu, and K. Mizuno, Effect of additives on the reduction of $\text{PM}_{2.5}$ emissions during pulverized coal combustion, *Energy & Fuels*, **23**(7), 3412-3417 (2009).
- P. Pintana, and N. Tippayawong, Predicting ash deposit tendency in thermal utilization of biomass, *Eng. J.*, **20**(5), 15-24 (2016).
- S. Liu, H. Yang, Z. Zhang, J. Chen, C. Chen, T. Guo, Y. Cao, and W. Jia, Emission characteristics of fine particles from wet flue gas desulfurization system using a cascade of double towers, *Aerosol Air Qual. Res.*, **18**(7), 1901-1909 (2018).
- G. Santachiara, F. Prodi, and F. Belosi, A review of thermo-and diffusio-phoresis in the atmospheric aerosol scavenging process, *Atmos. Climate Sci.*, **2**(2), 148-158 (2012).