

## 미세액적에 의한 미세먼지 포집 가시화 연구

오진호\* · 김현동\*\* · 이정언\*\*\* · 양준환\*\*\* · 김경천†

### A Study on Visualization of Fine Dust Captured by FOG Droplet

Jinho Oh\*, Hyun Dong Kim\*\*, Jung-Eon Lee\*\*\*, Jun Hwan Yang\*\*\*, Kyung Chun Kim†

**Abstract** An experiment to visualize fine dust captured by FOG droplet is conducted. Coal dust with 23.56 MMD (Mean Median Diameter) and water with 17.02 MMD is used as fine dust and FOG droplet. Long distance microscope and high-speed camera are used to capture the images of micro-scale particles sprinkled by acrylic duct. After measuring and comparing the size of the coal dust and FOG droplet to MMD, process to seize the coal dust with FOG droplet is recorded in 2 conditions: Fixed and Floated coal dust in the floated FOG droplet flow. In both conditions, a coal dust particle is collided and captured by a FOG droplet particle. A FOG droplet particle attached at the surface of the coal dust particle does not break and remains spherical shape due to surface tension. Combined particles are rotated by momentum of the particle and fallen.

**Key Words** : Fine dust(미세먼지), FOG droplet(미세액적), Particle collision(입자충돌), Particle coalescence(입자결합)

### 1. 서론

국내 석탄화력발전소에서 발생하는 미세먼지는 석탄회와 석탄분진 2종류가 있다. 석탄의 연소 후 발생하는 석탄회는 전기 집진기 혹은 여과 집진기와 같은 설비로 제거 가능하다. 하지만 입자 크기가 약 30 로 미세한 석탄분진은 실내의 저탄장 및 석탄 이송 컨베이어벨트에서 공기 중에 부유하기

때문에 포집이 어려워, 석탄분진 저감을 위한 설비가 구축되지 않고 있다. 석탄분진의 크기로 인한 포집의 어려움과 마찰에 의한 발화로 인한 화재의 위험성 때문에 전기 집진기와 여과 집진기 같은 기존 설비를 사용하기 부적절하여, 최근 미세한 석탄분진의 포집을 위해 미세액적을 이용하는 방법이 고안되어 연구가 진행되고 있다.

미세액적을 이용한 비산먼지 저감효과는 실험과 전산을 통해 확인되었다. An (2012)와 Lee et al. (2019)는 액적 분무를 통해 석탄 야적장에서 발생하는 비산먼지 저감효과를 실험적으로 확인하였으며,<sup>(1,2)</sup> Kang et al. (2020)은 전산해석을 통해 깔리리움 내 액적 분무 노즐의 위치와 각도에 따른 액적의 유동을 연구하였다.<sup>(3)</sup> 선행 학자들의 연구를 통해 미세액적의 석탄분진 포집 효과를 확인할 수 있지만 두 입자의 충돌 및 결합에 대해 충분한

† School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University, Professor  
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering,  
Pusan National University, MS Student

\*\* Rolls-Royce University Technology Center,  
Pusan National University

\*\*\* Bopyong GRIN Company, Ulsan, South Korea

연구가 이루어지지 않았다.

액체와 고체 입자의 충돌에 관한 실험은 오랫동안 진행되었으며, 구형 고체 구조물에 액적을 떨어뜨려 액적의 *Splashing threshold*와 고체 구조물과 액적 사이의 *Weber number*의 관계가 주로 연구되었다.<sup>(4,7)</sup> Pawar et al. (2016)은 크기 2.5~4.0 mm의 고정된 유리 입자와 직경 2.9 mm의 물 액적의 결합에 대해 연구하였으며, 두 입자의 충돌 방법에 따른 입자의 결합 및 탈착에 대해 연구하였다.<sup>(8)</sup> 하지만 마이크로 단위의 두 입자의 충돌 및 결합에 대한 가시화는 이루어지지 않았으며, 마이크로 단위의 입자 결합 원리는 추측으로 남아있다.

본 연구에서는 마이크로 단위의 석탄분진 입자와 미세액적의 충돌 및 결합을 *Long distance microscope*를 통해 가시화하였다. 분무된 미세액적은 자유낙하하였고, 석탄분진은 미세액적 유동장 내에 고정되거나 대향류 유동의 2 가지 조건에서 포집 실험을 진행하였다. 본 연구를 통해 마이크로 단위의 입자 결합을 직관적으로 확인할 수 있으며, 결합 원리 규명을 위한 기초 연구로서 활용 가능하다.

## 2. 시료 분석

### 2.1 석탄분진 크기 분석

본 연구에 사용한 석탄분진은 화력발전소 내 석탄 이송 및 야적장에서 채취되었으며, 미세액적은 물을 사용하였다. 석탄분진 입자는 표면이 불규칙적이고 소수성을 띄는 불규칙한 무정형의 구조로, 석탄분진은 미세액적이 부착하기 어려운 특성을 지닌다.<sup>(2)</sup> 석탄분진과 미세액적의 결합에 영향을 주는 주요 인자는 입자 사이의 충돌 및 간섭효과로, 미세액적 크기가 고체분진 크기보다 작고 미세액적 개수가 많을수록 액적 표면의 이온에 의한 에너지 층 증대로 충돌 및 간섭에 의한 부착 효율이 증가한다.<sup>(9)</sup> 석탄분진과 미세액적의 결합 가능성을 확인하기 위해, 석탄분진 입자와 미세액적의 크기를 측정하였다.

석탄분진 입자 크기는 고체 입자에 주로 사용되는 *Malvern Panalytical*사의 *Mastersizer 2000* 입도

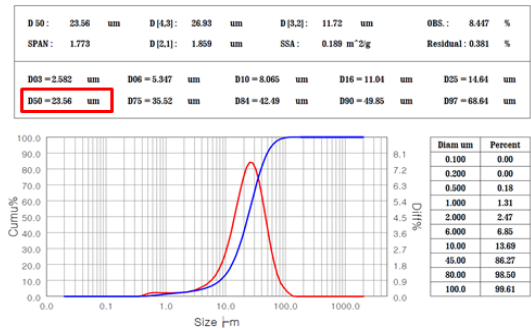


Fig. 1. Diameter distribution and mean median diameter of coal dust

분석기로 측정하였고, 수중에서 초음파를 통해 분산된 석탄분진 입자를 레이저로 감지하여 입자 크기 누적분포와 질량중앙직경(Mass Median Diameter)을 측정하였다. Fig. 1은 입도분석기로 분석된 석탄분진 크기 측정 결과다. 석탄분진 크기 측정 결과, 석탄분진 크기는 0.5~100  $\mu\text{m}$ 의 넓은 범위로 분포하였으며, 석탄입자 평균 크기는 23.56  $\mu\text{m}$ 로 조사되었다. 또한, 80  $\mu\text{m}$  이하 크기의 석탄분진이 98.5 %로 측정되어, 화력발전소 내 석탄분진은 마이크로 크기로 구성되어 있음을 확인하였다. 측정된 석탄분진과 미세액적의 충돌 및 간섭에 의한 부착 효율 증가를 위해 석탄분진보다 작은 크기의 미세액적을 분무할 수 있는 고압펌프 및 노즐을 선택하였다.

### 2.2 미세액적 크기 분석

Fig. 2는 미세액적 크기 측정을 위한 실험장치다. 미세액적 생성은 보평그린 사의 *FOG MASTER*를 이용했으며, 마이크로 단위의 미세한 액적을 만들기 위해 *FOG MASTER* 내부 고압펌프의 압력 및 유량을 각각 70 bar, 1.2 L/min으로 설정하였고, 직경 2 mm의 분무 노즐을 통해 미세액적을 분무하였다. 생성된 미세액적은 에어로졸 분석에 주로 사용되는 *Marvern Panalytical*사의 *Spraytec* 입도분석기를 사용해 크기를 분석하였으며, 미세액적에 의해 산란된 레이저 광의 각도를 분석하여 질량중앙직경 및 소터평균직경 (*Sauter Mean Diameter*)을 측정하였다.

Fig. 3은 레이저 회절을 이용해 분석한 미세액적



Fig. 2. Experimental setup to measure the FOG droplet diameter

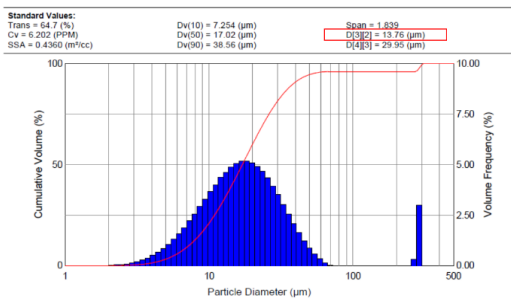


Fig. 3. Diameter distribution, mean median diameter and Sauter mean diameter of FOG droplet

크기 측정 결과다. 미세액적은 2 μm부터 70 μm까지 분포하였고, 미세액적의 질량중앙직경과 소터 평균직경은 각각 17.02 μm, 13.76 μm으로 조사되었다. 또한, 미세액적의 90 %는 질량중앙직경 기준 38.56 μm 내에 분포하였다. 입도분석기를 이용한 미세액적 크기 분석을 통해 미세액적 크기가 석탄분진 입자에 비해 작은 것을 확인하였고, 그 결과 충돌 및 간섭에 의한 석탄분진 표면에서의 미세액적 부착 현상이 활발히 일어날 것으로 분석되었다.

### 3. 실험 장치 및 실험 방법

#### 3.1 실험 장치

Fig. 4는 미세액적에 의한 석탄분진 포집 현상 가시화를 위한 실험장치의 개략도다. 확대된 석탄분진 입자와 미세액적 이미지를 획득하기 위해 Working distance 가 60 mm 이상인 Long distance

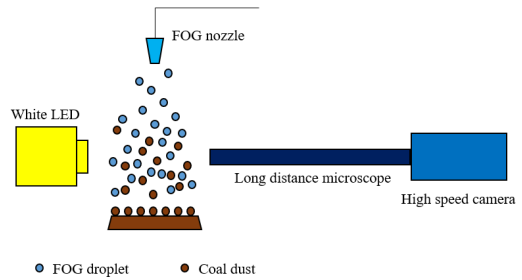


Fig. 4. Schematic of the experimental setup

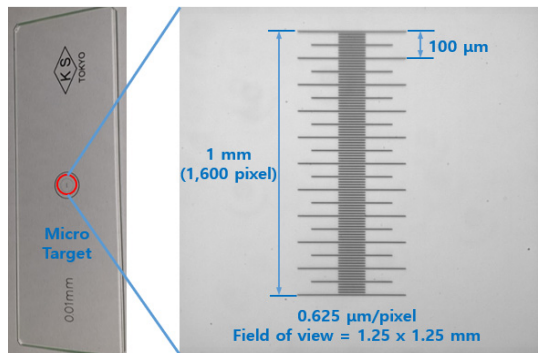


Fig. 5. Micro target for camera calibration

microscope를 사용하였고, 연속적인 입자 거동 촬영을 위해 PC사의 pco.dimax HS1 초고속카메라를 현미경 뒤에 설치하였다. 공기 중에 부유하는 미세액적과 석탄분진 거동 가시화는 Shadow graphic high speed imaging 기법을 적용하였으며, 광원으로는 백색광의 LED를 사용해 이미지 노출 시간 및 이미지 획득 속도를 각각 15 μs 및 4,000 fps로 설정하여 촬영하였다.

Fig. 5는 석탄분진과 미세액적 이미지로부터 크기를 측정하기 위해 적용된 마이크로 타겟이다. 마이크로 타겟은 최소 눈금 사이 간격이 10 μm인 슬라이드 글라스 형태로, 초고속카메라 이미지 센서의 픽셀당 물리적 길이를 계산하기 위해 2,000 × 2,000 pixel의 센서로 촬영하였다. 타겟 1 mm에 해당하는 픽셀 수는 1,600 개로, 초고속카메라의 공간분해능은 약 0.625 μm/pixel, 이미지 측정 범위는 약 1.25 × 1.25 mm로 계산되었다. 촬영된 석탄분진 및 미세액적 이미지는 측정된 공간분해능에 의해 22~30 pixel로, 석탄분진과 미세액적 가시화에 충분한 배율을 확보하였다.

### 3.2 실험 방법

Fig. 6은 공기 중에 부유하는 미세액적과 석탄분진이다. 미세액적에 의한 석탄분진 포집 현상 가시화를 단계적으로 접근하기 위해 공기 중에 부유하는 석탄분진과 미세액적 이미지를 획득하는 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 미세액적은 한 변의 길이가 0.5 m인 정육면체 아크릴 챔버를 제작하여 챔버 가장자리에 설치된 출구로 분부되어, 상대적으로 좁은 영역을 측정하는 현미경 이미지에서도 미세액적의 거동을 효율적으로 촬영 가능하도록 설계하였다. 또한 공기 중에 부유하는 석탄분진을 위해 팬을 사용하여 아래에서 위로 이동할 수 있는  $5 \times 10$  mm 단면적의 아크릴 덕트를 제작했으며, 석탄분진을 공기 중에 균일하게 분산시키고 Packing density를 높이기 위해 아크릴 덕트 출구에 알루미늄 망을 설치하였다.

미세액적에 의한 석탄분진 포집은 고정된 석탄분진과 공기 중에 부유하는 석탄분진 2 조건에 대해 실험을 진행하였다. 석탄분진 입자 고정은 32G 규격의 주사기 바늘을 이용했으며, 주사기 끝에 석탄분진 입자를 붙여 자유낙하하는 미세액적 유동장 가운데 바늘을 고정하여 미세액적의 고정된 석탄입자 포집을 가시화하였다. 또한 하강하는 미세액적의 대향류 유동을 생성하여, 석탄분진이 토출되는 아크릴 덕트와 미세액적이 토출되는 아크릴 덕트가 만나는 지점에서 입자들의 충돌 현상을 촬영하였다.

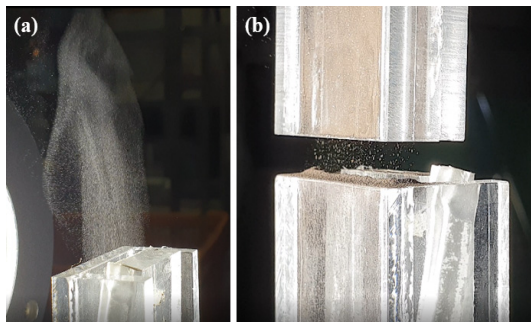


Fig. 6. Sprinkled particles from acrylic duct  
(a) FOG droplet (b) coal dust

## 4. 실험 결과

### 4.1 석탄분진 입자 및 미세액적 가시화

Fig. 7은 공기 중에 부유하는 미세액적 크기 측정 결과이다. 토출된 미세액적은 공통적으로 구 형태를 띠고 있었으며, 직경  $5 \mu\text{m}$  이하의 미세액적은 상대적으로 낮은 광량으로 입자의 경계면을 정의하기 어려워 입자 직경 측정 정확도가 상대적으로 낮았다. 미세액적의 직경이 약  $15 \mu\text{m}$  이하의 경우 구형의 미세액적에 의해 LED 광원으로부터 들어오는 빛이 굴곡되어 전체적으로 어둡게 나타나지만,  $15 \mu\text{m}$  이상의 직경을 가진 미세액적은 전반사의 영향으로 중심의 밝은 영역과 주변의 어두운 형태가 공존하였다. 초고속카메라로 가시화된 미세액적의 최소 및 최대 직경은 각각  $7.9 \mu\text{m}$ 와  $28.4 \mu\text{m}$ 로, 입도분석기로 분석한 미세액적 분포도 내에 존재하였다.

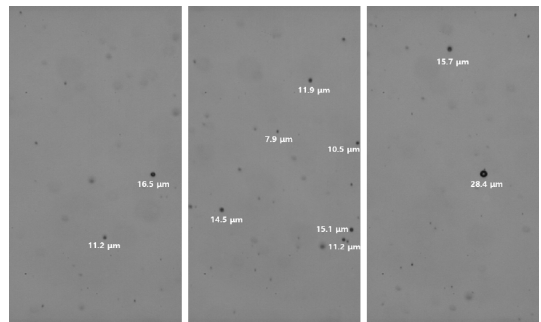


Fig. 7. FOG droplet diameter measured by long distance microscope

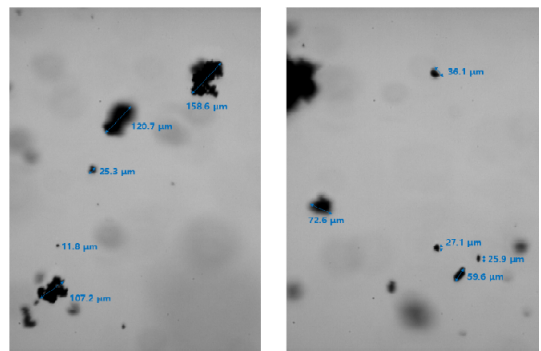


Fig. 8. Coal dust length measured by long distance microscope

Fig. 8은 공기 중에 부유하는 석탄분진 이미지와 크기 측정 결과이다. 구형의 미세액적과는 다르게 석탄분진은 다양한 형태를 띠고 있었으며, 빛이 석탄입자를 투과하지 못해 전체적으로 검은 그림자 형태를 띠었다. 최대 폭  $10\ \mu\text{m}$  이하의 석탄분진은 낮은 광량으로 입자의 경계면을 정의하기 어려웠으며, 질량중양직경 기준 98.5 % 내에 속하지 않는 여러 분진이 응집된 크기  $100\ \mu\text{m}$  이상의 석탄분진도 관찰되었다. 측정된 단일 석탄분진의 최대 및 최소 크기는 각각  $11.8\ \mu\text{m}$  및  $72.6\ \mu\text{m}$ 로, 입도분석기로 분석한 석탄분진 분포도 내에 존재하였다.

#### 4.2 미세액적의 고정된 석탄분진 포집

Fig. 9~11는 고정된 석탄분진 입자와 공기 중에 부유하는 미세액적의 충돌 및 포집 현상을 시간에 따라 순차적으로 나열하였다. Fig. 9는 직경  $31.7\ \mu\text{m}$ 의 미세액적이 유사한 크기  $29.4\ \mu\text{m}$ 의 석탄분진과 충돌 후 포집하여 좌측으로 끌고가는 것을 가시화했으며, Fig. 10은 직경  $29\ \mu\text{m}$ 의 미세액적이 가로  $75\ \mu\text{m}$  세로  $20\ \mu\text{m}$ 의 기둥 형태를 가진 석탄분진 입자와 충돌하여 아래쪽으로 끌고가는 현상을 가시화하였다. 미세액적은 기둥 형태의 석탄분진 모서리에 접촉하였지만 충돌 후 분리되지 않고 결합된 상태를 유지하면서 낙하하였다. Fig. 11은 직경  $68\ \mu\text{m}$ 의 미세액적이 크기  $98\ \mu\text{m}$ 의 석탄분진과 충돌 후 포집 하는 현상을 가시화하였으며, 충돌 후

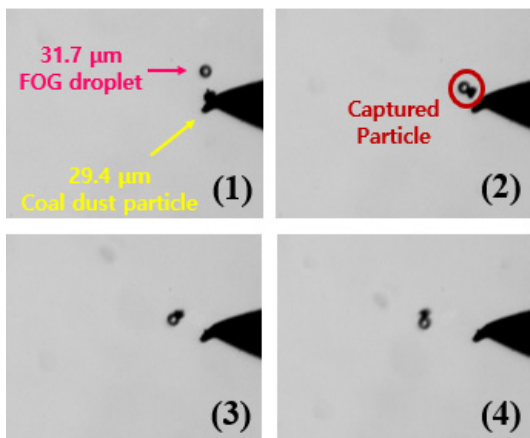


Fig. 9. Fixed  $29.4\ \mu\text{m}$  coal dust particle captured by  $31.7\ \mu\text{m}$  FOG droplet (Time lapse: (1) → (4))

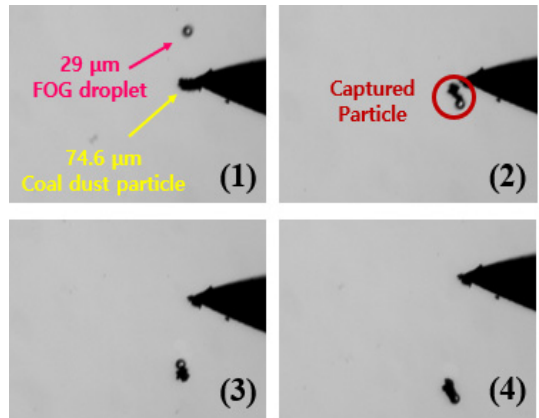


Fig. 10. Fixed  $74.6\ \mu\text{m}$  coal dust particle captured by  $29\ \mu\text{m}$  FOG droplet (Time lapse: (1) → (4))

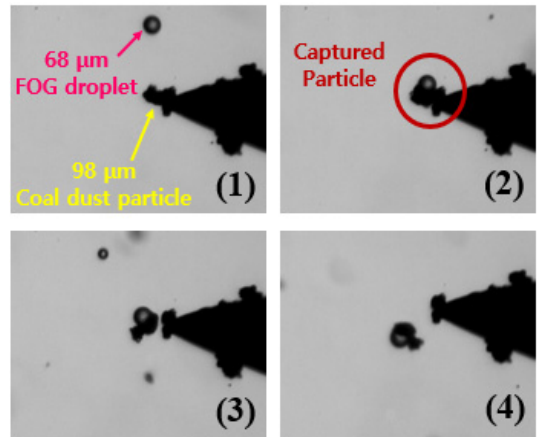


Fig. 11. Fixed  $98\ \mu\text{m}$  coal dust particle captured by  $68\ \mu\text{m}$  FOG droplet (Time lapse: (1) → (4))

합쳐진 입자는 미세액적의 운동량에 의해 석탄분진을 아래로 이송했다. 입자 크기와 상관없이 석탄분진과 접촉한 미세액적은 석탄분진 표면에 균일하게 도포되지 않고, 표면장력에 의해 충돌 이후에도 원형을 유지하였다.

#### 4.3 미세액적의 부유하는 석탄분진 포집

Fig. 12는 공기 중에 부유하는 석탄분진과 미세액적의 대항류 유동 조건에서의 충돌 및 포집 현상을 시간에 따라 순차적으로 나열하였다. 직경  $25.7\ \mu\text{m}$ 의 미세액적이 유사한 크기  $22\ \mu\text{m}$ 의 석탄분진과 충돌 후 길이 약  $40\ \mu\text{m}$ 의 하나의 입자가 되

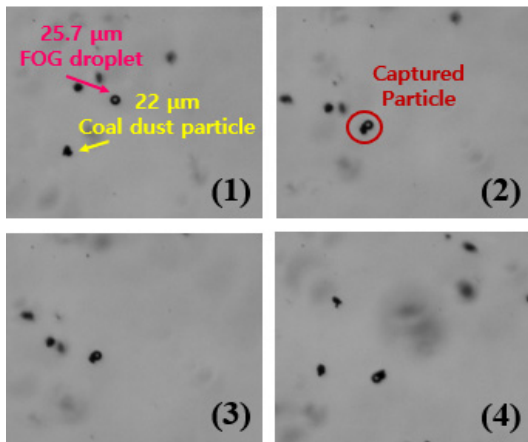


Fig. 12. Floated  $22\ \mu\text{m}$  coal dust particle captured by  $25.7\ \mu\text{m}$  FOG droplet (Time lapse: (1)  $\rightarrow$  (4))

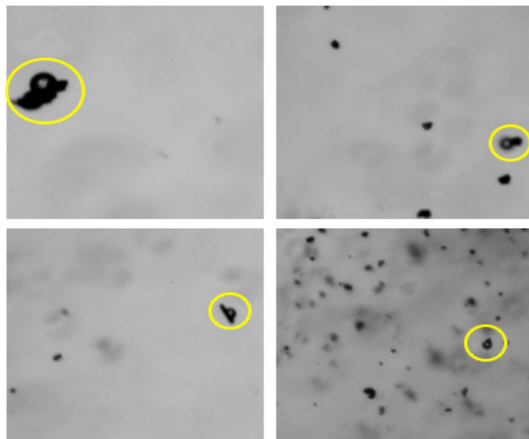


Fig. 13. Various size of floated coal dust particles captured by FOG droplet

고, 충돌에 의해 두 입자의 운동량은 상쇄되어 병진운동이 멈추게 되고 중심부 근처에서 회전운동을 하며 낙하하였다.

Fig. 13은 미세액적과 충돌 후 포집된 다양한 석탄분진 이미지다. 직경  $20\sim 120\ \mu\text{m}$  사이에 분포하는 미세액적은 공기 중에 부유하는 다양한 크기와 형태의 석탄분진과 충돌 후 결합하였으며, 하나의 입자가 된 미세액적과 석탄분진은 크기가 증가하였다. 공통적으로 석탄분진과 미세액적은 충돌 후 회전하며 바닥을 향해 떨어졌다.

## 5. 결론

본 연구에서는 Long distance microscope와 초고속카메라를 이용해 마이크로 단위의 미세액적과 석탄분진의 충돌 및 결합을 가시화하였다. 가시화된 석탄분진과 미세액적 크기는 입도분석기로 조사된 입자 크기 분포 내에 존재하였다. 자유낙하하는 미세액적 유동 속 고정되거나 대향류 유동 조건의 석탄분진은 공통적으로 비슷한 크기의 미세액적과 충돌 후 포집되었으며, 입자의 크기가 증가했다. 또한 미세액적은 표면장력의 영향으로 충돌 이후에도 석탄분진 입자 표면에 도포되지 않고 구형을 유지하였다. 충돌된 두 입자는 운동량의 충돌로 회전운동을 하며 바닥을 향해 떨어졌다.

미세액적의 석탄분진 포집 현상 가시화 실험을 통해 마이크로 단위의 미세 입자들의 결합을 직관적으로 확인하였다. 본 연구결과를 통해 미세액적과 석탄분진의 결합에 의한 새로운 포집 시스템 개발 및 미세 입자 크기 및 속도 제어를 이용한 마이크로 단위의 입자 결합 원리 규명을 기대할 수 있으며, 포집 효율 증가를 유도할 수 있는 미세 난류 구조 생성이 가능한 유로와 반응 챔버의 설계가 추가로 고려될 필요가 있다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## REFERENCE

- 1) An, J. G., 2012, "A Study on an Efficient Reduction Plan of Scattering Dust Generated at Outdoor Coal Yard," Master's Thesis in Sungkyunkwan University.
- 2) Lee, J. E., Byeon, H., Kim, N. H., Kim, S. H., and Lee, S.Y., 2019, "A Study for Scattering Reduction of Coal Dust by Collision and Adhesion Between Fog Droplet and Coal Dust Particles," J. Korean Soc. Mech. Technol., Vol. 21(5), pp.802~807.
- 3) Kang, S. H., Song, H. E., and Ahn, Y. C., 2020,

- “A Study on the Water Spray System for Coal Dust Reduction Considering Internal Flow by Belt Operation,” *J. Power System Engineering*, Vol. 24(3), pp. 14~22.
- 4) Hardalupas, Y., Taylor, A.M.K.P., and Wilkins, J. H., 1999, “Experimental investigation of sub-millimetre droplet impingement on to spherical surfaces,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 20(5), pp. 477~485.
  - 5) Liang, G., Guo, Y., Mu, X., and Shen, S., 2014, “Experimental investigation of a drop impacting on wetted spheres,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 55, pp. 150~157.
  - 6) Bakshi, S., Roisman, I. V., and Tropea, C., 2007, “Investigations on the impact of a drop onto a small spherical target,” *Phys. Fluids*, Vol. 19, 032102.
  - 7) Charalampous, G., and Hardalupas, Y., 2017, “Collisions of droplets on spherical particles,” *Phys. Fluids*, Vol. 29, 103305.
  - 8) Pawar, S. K., Henrikson, F., Finotello, G., Padding, J. T., Deen, N. G., Jongsma, A., Innings, F., and Kuipers, J. A. M. H., 2016, “An experimental study of droplet-particle collisions,” *Powder Technol.*, Vol. 300, pp. 157-163.
  - 9) K. Ardon-Dryer., Y.-W. Huang., and D. J. Cziczo., 2015, “Laboratory studies of collection efficiency of sub-micrometer aerosol particles by cloud droplets on a single-droplet basis,” *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 15(16), pp. 9159~9171.