J. Korean Soc. Combust. 27(4) (2022) 50-58

〈학술논문〉 DOI: https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.4.050 ISSN 1226-0959
eISSN 2466-2089

습식 성장한 ULSD 입자상 물질의 물리적 및 화학적 특성 분석에 관한 연구

강별* · 박설현**†

*조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과
**조선대학교 기계공학과

Physical and Chemical Properties of ULSD Particulate Matter with Hygroscopicity

Byeol Kang* and Seul-Hyun Park**†

*Department of Mechanical System & Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University
**Department of Mechanical Engineering, Chousn University

(Received 23 November 2022, Received in revised form 27 November 2022, Accepted 29 November 2022)

ABSTRACT

Condensation of water can affect the morphology of particulate matter (PM) produced from burning hydrocarbon fuel and thus their refractive index, eventually altering the light scattering properties of particles. Optical characteristics of PMs released in the air is an essential research to reduce uncertainty in terms of environmental and climate models. However, research results on the effect of hygroscopicity of particulate matter on optical properties are relatively insufficient. Therefore, in this study, optical characteristics were studied through physical and chemical analysis of Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD) PM produced under different relative humidity conditions. While Transmission Electron Microscope(TEM) analysis was performed to confirm the physical shape, Raman spectra & total carbon analysis were performed to elucidate the degree of graphitization of carbon of PM. Results obtained from series of analyses clearly indicate that ULSD PM reacted with water to collapse the agglomerate structure into a compact form, thus resulting in an increase in the light scattering effect.

Key Words : Ultra Low Sulfur Diesel, Relative Humidity, Scattering, Fractal parameter

기 호 설 명

ULSD : Ultra Low Sulfur Diesel	D_f : Fractal dimension
RH : Relative Humidity	k_f : Fractal prefactor
d_p : Particle diameter	A_a : Projected area
x_p : Optical diameter	

1. 서 론

연소 과정에서 발생하는 그을음의 일종인 입자상 물질(Particulate Matter, PM)은 심장 질환, 호흡 질환 등을 유발하여 인체 건강을 위협하고 시정 장애, 기후 온난화 및 냉각화 등 환경적으로 유해한 영향을 미칠 수 있다[1-4]. 특히 기후 문제를 유발하는 주된 요인은 PM의 광학적 특성(산란 및 흡수)과 연관된 것으로 알려져 있다. PM의 태양광 산란 효과가 증가하는 경우 대기를 냉각시키는 음(−)의 복사 강제력(Aerosol Radiative Forcing, ARF)을 유발하며, PM에 포함된 원소 탄소(Elemental Carbon, EC)는 태양광 복사에너지를 흡수하고 재방출하는 특성으로 인해 대기를 가열시켜 양(+)의 복사 강제력을 유발시킬 수

†Corresponding Author, isaac@chosun.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다[5]. 하지만 PM에 의한 ARF의 예측은 기후 모델에 있어 가장 불확실한 요소로 보고되고 있다[6-7]. 이는 대부분의 기후 모델에서 사용되는 복사 모델이 Mie 산란이론을 기반으로 하고 있어 PM의 형상을 구형으로 가정하기 때문이다. 하지만 실제 대기 중에 방출되어 습식 성장(Hygroscopic Growth)[8]을 거듭한 2차 생성 PM의 경우 구형이 아닌 프랙탈 기하학(Fractal Geometry)적 형상을 갖게 되므로 Mie 산란이론을 기반으로 PM의 ARF를 예측한 경우 부정확한 결과를 도출할 수 있다.

따라서, 기후 모델에서 대기 중 PM에 의한 ARF 예측 불확실성을 줄이기 위해 PM의 프랙탈 형상에 대한 정보가 중요하다[9]. PM의 흡습성은 대기 중 체류시간과 상관성이 깊고 광학 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있는 것으로 보고되고 있다[10]. 다양한 상대 습도 조건에서 질산염, 황산염, 암모늄과 같은 무기염의 응축을 통해 생성되는 2차 생성 PM의 생성 및 성장 메커니즘[11-12]은 상대적으로 잘 정립되어 있으나, 유기물 탄소(Organic Carbon, OC) 성분 PM의 습식 성장에 대한 연구는 비교적 미흡한 실정이다. 최근 제시된 ARF 예측 모델에는 PM의 EC성분은 물론 OC성분에 의한 태양 복사에너지의 흡수 및 산란에 대한 영향을 고려하고자 하는 움직임이 활발해 지고 있다[13-14]. 본 논문에서는 주로 연소 과정 직후 배출되는 1차 발생 PM의 습식 성장 시 입자의 EC와 OC의 성분 및 물리적 형상 변화에 대해 살펴보고자 하였다. 이를 위해 층류 확산 화염 주변의 상대 습도가 상이하게 조절된 조건에서 배출된 PM을 포집하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 연료는 시중에서 쉽게 구입 가능한 초저황경유(Ultra Low Sulfur Diesel, ULSD)로 경유 차량에서 배출되는 PM의 환경적 관심과 연구 결과 활용 가능성을 고려하여 선정하였다. 사용된 USLD 연료의 주요 성분과 물성은 Table 1에 정리되어 있다.

USLD 연료를 연소시켜 PM을 발생시키기 위해 동축류 확산 화염 버너를 사용하였으며 본 연구에 사용된 버너의 형상 및 특징은 참고문헌[15]에 잘 정리되어 있다. Fig. 1은 동축류 확산 화염 버너를 비롯한 주요 실험 장치를 도시한 개략도이다. PM을 발생시키기 위해 사용된 동축류 확산 화염 버너는 액상인 ULSD 연료를 기화시켜 버너에 공급되는 유량을 일정하게 유지하기 위해 설치된 전용 증발기에 연결되어 있다. 동축류 버너의 중심에 위치한 지름 약 3 mm 원형관을 통해 기화된 ULSD 연료가 공급된다. 동축류 버너의 내부 공간은 지름이 약 6 mm인 스테인리스 비드를 채워 균일한 산화제 공급을 유도하였다. 기화기부터 동축류 버너의 중심관과 동축류 버너의 외부에는 밴드 히터를 설치하여 가열을 통해 기화된 ULSD 연료의 응축을 방지하였다. 산화제로는 공기(Dry air)를 사용했으며 버너의 하단 측면 라인을 통해 연료 중심관 주변으로 공급된다. 기화된 ULSD 연료는 질소(N_2) 가스를 이용하여 동축류 버너의 중심관으로 이송되며 중심관 상단에 설치된 스파크 점화기를 통해 강제 점화된다.

액체 ULSD 연료는 250 ㎖ 스테인리스 실린더에 저장되며 가압된 질소 가스에 의해 증발기로 이송될 수 있도록 설계되어 있다. 연료, 공기, 질소가 이송되는 라인에는 전용 질량 유량계(Mass Flow Controller, MFC)를 설치하여 실험이 진행되는 동안 각 유체의 유량을 일정하게 유지하였다. Table 2에는 ULSD 연료의 연소를 위한 실험 조건이 정리되어 있다. 상대 습도를 제외한 연료, 산화제, 이송(질소) 가스의 유량은 고정되었으며 사전 실험을 통해 안정적인 확산 화염의 생성과 PM 포집을 위한 최적의 조건을 도출하였다.

화염 주위의 상대 습도를 일정하게 유지하기 위해 버너를 포함한 후드 유입 전 공간까지를 아크릴판을 이용하여 밀폐하였다. 버너 밑단에 설치된 가습기와 후드의 흡입 유량을 최적으로 조절하여 각각의 상대 습도 조건을 유지하였으며, 최소 1시간 가량의 안정적인 습도 유지 확인 후 실험을 진행하였다. 상대 습도는 온습도 센서와 DAQ를 통

Table 1. Summary of chemical and physical properties of ULSD used in the present study

Contents	Unit	Value
Density	g/cm^3	0.825
Carbon Residue	(m/m)%	0.015
Sulfur content	(m/m)%	< 0.001
Water & Sediment	(v/v)%	< 0.02
Flash point	°C	> 40.0
Ash content	(m/m)%	< 0.02
Kinematic Viscosity (40°C)	mm^2/s	2.825
Pour point	°C	< 0

Table 2. Experimental conditions for burning ULSD

ULSD [g/h]	Air [L/min]	N_2 (Carrier) [L/min]	Relative Humidity [%]
6.5	3.5	3.5	23~64

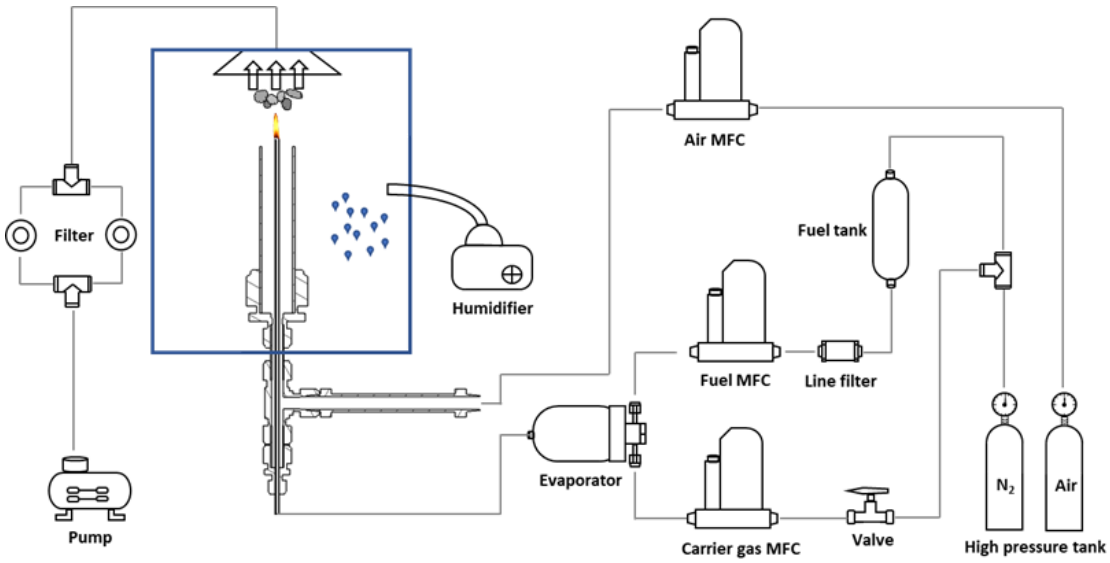


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

해 실험이 진행되는 동안 실시간으로 모니터링하였다. 확산 화염의 끝단에서 배출되는 PM은 버너 상단에 설치된 후드와 연결된 진공펌프를 작동시켜 펌프 앞단에 설치된 석영 섬유 필터에 포집하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 상대 습도별 PM의 물리적 형상 분석

PM의 물리적 형상은 광산란에 영향을 줄 수 있으며[16] 광산란(K_s)의 영향은 식 (1)을 이용하여 수치적으로 표현할 수 있다.

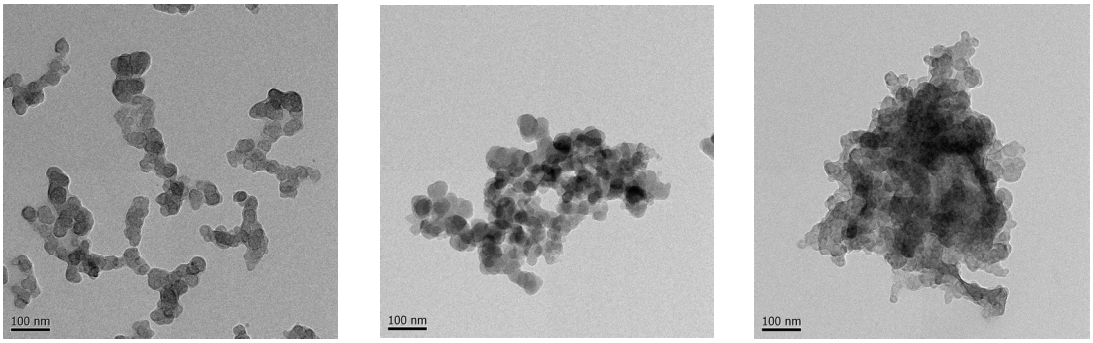
$$K_s = 4\pi x_p^3 k_f F(m)\left(\frac{3D_f}{16x_p^2}\right)^{\frac{D_f}{2}} \quad (1)$$

식 (1)에서 $x_p(=\pi d_p/\lambda)$는 입자의 광학 직경으로 평균 단일 입자의 직경(Primary particle diameter)과 레이저 파장의 상관 관계로 나타낼 수 있다. k_f와 D_f는 각각 프랙탈 선인자(Fractal prefactor), 프랙탈 차원(Fractal dimension)이며 $F(m)$은 굴절지수(Refractive Index)의 함수이다. k_f와 D_f는 입자 응집체 형상에 따라 변하는 구조적 계수이며 응집체 형상 특성을 설명하는 핵심 매개 변수로 사용된다[17]. D_f는 응집체를 구성하는 단일 입자의 수와 응집체 회전반경(R_g)의 관계로 정의할 수 있다. D_f 증가와 R_g의 감소는 응집체의 응집 밀도를 높여 k_f 증가에 기여하며, 입자의 단위 질량 당 산란 효과를 증가시키는 요인으로 보고되고 있다[16]. 이처럼 PM 응집체의 물리적 형상 매개 변수의 변화는 광산란에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 PM 생성 환경의 습도에 따라 달라지는 PM 응집체의 물리적 형상 변화를 체계적으로 분석하기 위해 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)을 이용하여 PM 응집체의 2차원 이미지를 획득하였다.

Fig. 2는 서로 다른 상대 습도 조건에서 포집된 ULSD PM 응집체의 TEM 이미지이다. TEM 분석은 JEOL社의 JEM-2010 모델을 사용했으며 가속전압 200 kV 조건에서 촬영하였다. 획득된 TEM 이미지로부터 PM의 물리적 형상 파라미터인 단일 입자 직경(d_p), 응집체 최대길이(L), 응집체 투영 면적(A_a)을 측정하였으며, 응집체의 매개 변수인 k_f와 D_f를 도출하였다. TEM 이미지로부터 PM 응집체의 물리적 형상 파라미터를 정량적으로 측정하기 위해서 디지털 이미지 프로세싱 소프트웨어인 ImageJ를 이용하여 배경 노이즈를 감소시키고, Fig. 3과 같은 응집체의 이진 반전 이미지(Inverted binary image)를 획득하였다[18].

응집체 R_g의 경우 2D의 TEM 이미지에서는 직접적으로 구할 수 없으며 d_p, L, A_a의 상관관계로부터 계산하였다. PM 응집체의 기학적 프랙탈 기하학적 분석[19-21]은 식 (2) ~ (4)에 제시된 관계식을 이용해 계산하였다[22].

$$N = 1.15\left[\frac{A_a}{(\pi d_p^2/4)}\right]^{1.09} \quad (2)$$



(a) RH 23% (b) RH 43% (c) RH 64%

Fig. 2. TEM images of PM collected in different humidity conditions

$$N = k_f\left(\frac{2R_g}{d_p}\right)^{D_f} = k_L\left(\frac{L}{d_p}\right)^{D_f} \quad (3)$$

$$\frac{k_f}{k_L} = \left(\frac{L}{2R_g}\right)^{D_f} = \left(\frac{D_f+2}{D_f}\right)^{D_f/2} \quad (4)$$

위 식에서 N은 응집체의 단일 입자 수를 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 TEM 2차원 평면 이미지에서는 응집체의 R_g를 직접적으로 구할 수 없기 때문에 식 (3)에 제시된 R_g 대체 관계식을 이용하였으며, 이 때 k_L은 2차원 이미지에서 k_f와 같은 역할을 수행한다[23].

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 상대 습도 23% 조건에서 포집된 PM의 경우 응집체를 이루는 단일 입자가 가지 형태로 분기된 형상이 뚜렷하지만 습도가 각각 43, 64%로 증가함에 따라 가지 형태가 붕괴되고 응집체 내 단일 입자들이 겹쳐져 큰 덩어리를 이루는 것을 확인할 수 있다. 특히 단일 입자 형태는 상대 습도 23% 조건에서는 비교적 분명한 구 형태를 갖추고 있지만 상대 습도가 증가함에 따라 입자들이 겹쳐져 정확한 형태를 확인하기 어려워지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 응집체 및 단일 입자 형상의 변화는 프랙탈 매개 변수에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다.

Fig. 4는 상대 습도별 PM 응집체 내 단일 입자의 직경 분포를 나타낸 결과이다. 평균 단일 입자 직경 측정에는 각각의 상대 습도 조건에서 포집된 PM 입자 약 200개가 사용되었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 PM이 포집된 상대 습도가 23%에서 64%로 증가하면서 단일 입자의 직경 크기 분포가 전반적으로 다소 넓어지지만, 대부분 입자의 평균 직경은 35 ~ 45 nm 크기 사이에 분포하고 있다. 상대 습도별 측정된 단일 입자 간 평균 직경의 미소한 차이(약 7 nm)는 PM 포집 환경의 상대 습도가 높아짐에 따라 단일

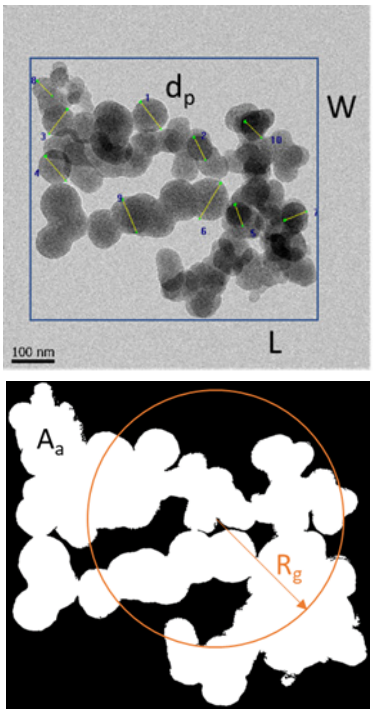
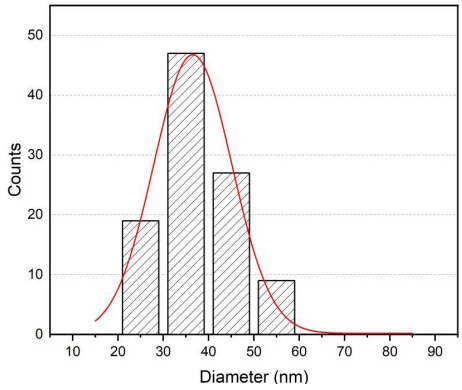
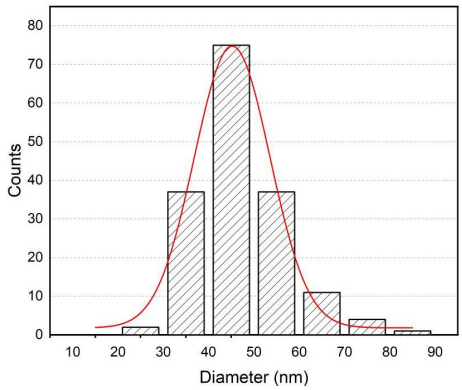


Fig. 3. Measurement of morphology parameter.

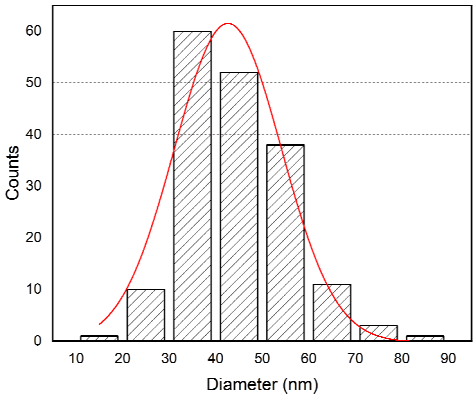
입자가 겹쳐 생성된 응집체를 분석하는 과정에 발생된 결과로 판단되며, 상대 습도가 입자 직경의 증감에 직접적으로 미치는 영향은 상대적으로 작을 것으로 사료된다. 이에 반해 입자 간 응집으로 인해 발생된 프랙탈 기하학적 형상 변화는 앞서 언급한 바와 같이 평균 단일 입자 직경의 변화에 비해 두드러진 변화를 보여주고 있다. 상대 습도가 다른 환경에서 포집된 PM 응집체의 프랙탈 매개 변수 측정 결과는 Table 2에 정리되어 있다. PM이 포집된 상대 습도 증가와 함께 TEM 이미지 상에서 관측된 응집체의 가지 분기 형태의 붕괴 및 덩어리짐 현상은 Table 3에 정리된 프



(a) RH 23%



(b) RH 43%



(c) RH 64%

Fig. 4. Measured Primary particle diameter distribution of PM collected in different humidity conditions.

랙탈 매개 변수의 변화로 설명할 수 있다. 상대 습도 증가와 함께 k_f는 전반적으로 증가하고 있으며, 이는 응집체를 구성하는 단일 입자의 응집 밀도가 증가함을 의미한다. 상대 습도가 23%와 43%인 조건에서 측정된 D_f는 약 1.2~1.3 정도로 유사한 가지 분기 형상을 지니고 있지만,

Table 3. Summary of morphological properties of PM collected in different humidity conditions

	d_p [nm]	D_f	k_f
RH 23%	37.53 ± 5.84	1.25	2.76
RH 43%	46.30 ± 5.85	1.20	3.46
RH 64%	44.60 ± 5.20	1.84	3.63

응집체 내의 단일 입자 응집 밀도는 상대 습도가 43% 인 조건에서 훨씬 높음을 알 수 있다. 반면 상대 습도가 64% 인 조건에 측정된 D_f와 k_f는 습도가 낮은 조건에 비해 훨씬 큰 값을 갖고 있으며, 이로 인해 많은 단일 입자로 구성된 덩어리 응집체 형상으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 이처럼 상대적으로 큰 D_f와 k_f 값을 갖는 응집체는 입사광에 대한 산란 기여도가 높은 것으로 보고되고 있다[24]. 이 결과를 바탕으로 본 연구를 통해 상대 습도가 높은 조건에서 포집된 PM은 광산란 효과가 클 것으로 예측해 볼 수 있다.

3.2 상대 습도별 PM의 화학적 특성 분석

본 연구에서는 포집된 PM의 화학적 특성을 분석하기 위해서 STEMart 社의 NRS-5100 Raman spectrometers를 이용하여 라만 분광(Raman spectroscopy) 해석을 수행하였고, 탄소 분석기를 이용하여 PM에 함유되어 있는 탄소 성분 중 EC와 OC의 구성비를 확인하였다. 라만 분광 해석 기법은 분자 진동에 의한 산란 에너지를 측정하여 입자의 화학적 구조를 정성적으로 파악하는데 주로 사용된다. 특히, 탄화수소계 연료의 연소 과정에 배출된 PM의 경우 Fig. 5와 같이 라만 스펙트럼 상에서 G, D 피크가 전형적으로 발견된다. G, D 피크는 각각 흑연화(Graphitic) 탄소 구조와 결함을 지닌 탄소 결합 및 무정형(Defect & Amorphous)의 탄소 구조를 의미한다. G, D 피크는 그림에서와 같이 G, D_1, D_2, D_3, D_4의 1차 라만 밴드의 합으로 구성되며, 각 밴드별 의미와 위치 정보는 Table 4에 정리하였다[25].

일반적으로 I_D/I_G, I_A/I_D 피크 비를 사용하여 탄소 구조의 비교가 가능하며 1 이상의 경우 결함을 지닌 탄소 결합 및 무정형의 탄소 구조가 우세하며, 1 미만의 경우 흑연화 탄소 구조를 갖는 것으로 이해할 수 있다. sp3 혼성화 결합 구조를 갖는 무정형 탄소 구조에 비해 흑연화 탄소 구조는 sp2 혼성화 결합 구조가 우세하며, π결합으로 인하여 빛을 흡수하는 성질이 강한 것으로 보고되고 있다[26]. PM의 포집 상대 습도 별로 Fig. 5에 도시된 라만 G, D 피크 비를 Fig. 6과 Table 5에 각각 정리하였다. 모든 상대 습도 조

Table 4. First-order Raman spectra of carbonaceous material

First Order Raman band			
Band	Initial Position	Type	Vibration Mode
G	1580 cm^{-1}	Lorenz	Ideal Graphitic Lattice (E_{2g} Symmetry)
D_1	1360 cm^{-1}	Lorenz	Disordered Graphitic Lattice (Graphene Layer edges / A_{1g} Symmetry)
D_2	1620 cm^{-1}	Lorenz	Disordered Graphitic Lattice (Surface Graphene Layers / E_{2g} Symmetry)
D_3	1500 cm^{-1}	Gaussian	Amorphous Carbon (Gaussian line shape)
D_4	1180 cm^{-1}	Lorenz	Disordered Graphitic Lattice (A_{1g} Symmetry)

Table 5. Measured Raman band area ratio of PM collected in different humidity conditions.

	RH 23%	RH 43%	RH 64%
I_D/I_G	0.99	0.94	0.93
I_A/I_D	0.58	0.58	0.58

건에서 I_D/I_G 피크의 비는 거의 1에 가까운 값을 보였으며, 이는 각 조건에서 포집된 PM의 흑연화 혹은 무정형의 탄소 구조가 거의 동일 비율로 구성되어있음을 의미한다. I_A/I_D 피크 비의 경우도 상대 습도 증가와 무관하게 세 조건에서 모두 0.58로 측정되었으며, 이 역시 상대 습도 변화에 의한 탄소 구조의 차이가 없다는 것을 의미한다.

앞서 설명한것과 같이 라만 스펙트럼의 G, D 피크는 1차 라만 밴드의 합으로 구성되어 있으며 deconvolution을 통해 각 밴드로 세분화하여 밴드별 면적비(band area ratio)를 비교하여 세부 탄소 구조의 정성적인 비교가 가능하다[25]. 각 밴드별 면적비 결과는 Fig. 7에 도시되어 있으며, 상대 습도 변화에 따른 1차 라만 밴드의 면적비 역시 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 화염 주위의 상대 습도 변화는 PM의 기본적 탄소 결합 구조에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 결론 내릴 수 있다. 이는 결국 PM의 탄소 결합 구조에 의한 광흡수 효과는 상대 습도 조건 변화에 민감하지 않음을 의미한다.

탄소 성분의 휘발 온도 차이와 빛 흡수 특성을 이용하는 열 광학적 분석법 NIOSH5040를 기초로한 탄소측정기(Thermal Optical OC/EC Analyzer, Sunset Laboratory Inc, USA)를 이용하여 EC 및 OC를 측정하였다. 일반적으로 PM 응집체에 포함된 EC는 소수성(Hydrophobic)의 성질이 강하고, OC는 친수성(Hydrophilic)의 성질이 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 포집된 PM의 경우 화염에서 배출된 직후(대기 중에 노출되어 기타 무기염들과 반

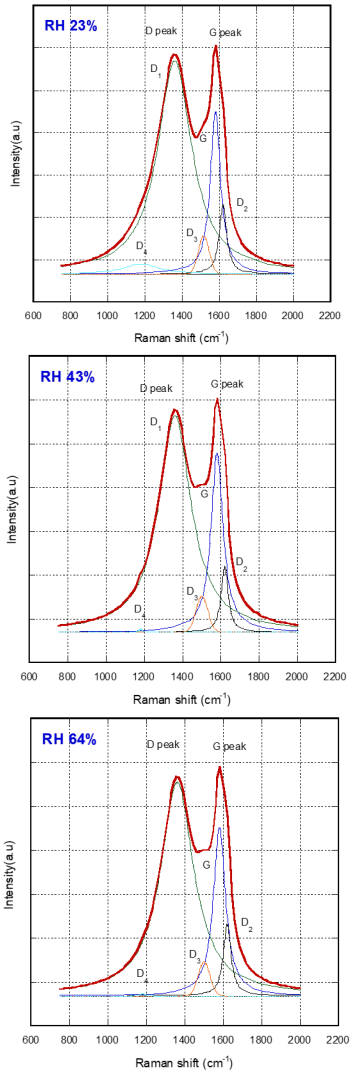


Fig. 5. Raman spectra of PM collected in different humidity conditions.

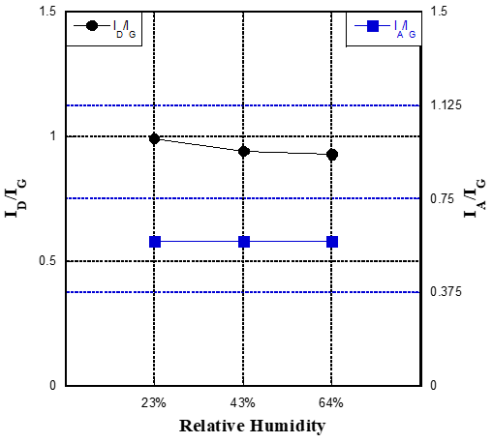


Fig. 6. Companions of Raman band area ratio of I_D/I_G and I_A/I_D .

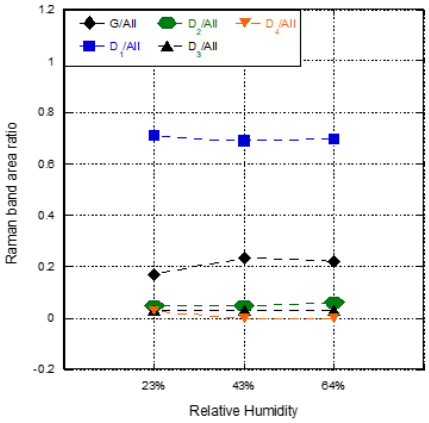


Fig. 7. Companions of Raman band area ratio for PM collected in different humidity conditions.

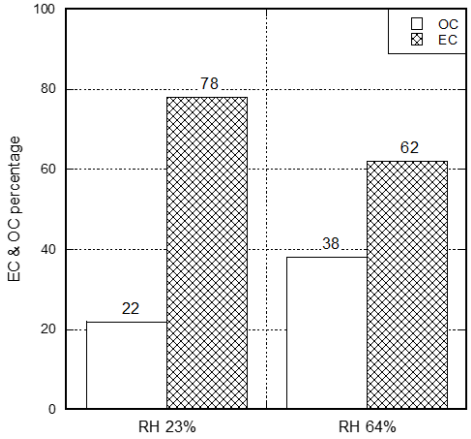


Fig. 8. Measured EC and OC ratio for PM collected in different humidity conditions.

응하기 이전에) 포집되었기 때문에 상대 습도 증가에 따라 PM 입자의 응집도가 높아지는 결과는 PM 내 친수성이 강한 OC의 함량과 상관성이 있을 것으로 판단된다. Fig. 8에는 상대 습도가 각각 23%와 64%인 조건에서 포집된 PM의 전체 탄소 함량 중 EC와 OC가 차지하는 비율을 측정하여 그 결과를 도시하였다. 상대 습도 23%일 때 EC와 OC 비율이 각각 78, 22%에서 상대 습도가 64% 증가한 조건에서는 그 비율이 62, 38%로 OC의 함량이 증가한 것을 확인하였다. 즉, 상대적으로 습도가 높은 습윤 환경에서 생성된 PM의 경우 친수성이 강한 OC가 물과 결합하여 성장하는 습식 성장을 통해 단일 입자의 응집 밀도가 높은 응집체로 발달된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 동축류 확산 화염 버너를 이용하여 ULSD-공기 화염에서 배출된 PM을 포집하여 물리적 및 화학적 특성을 비교 분석하였다. 특히 동일한 연소 환경에서 화염 주변의 상대 습도를 23~64%로 조절하여 서로 다른 상대 습도 조건에서 성장한 PM을 포집하고 TEM 이미지 분석, 라만 분광 해석, EC&OC ratio 분석을 수행하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 화염 주변의 상대 습도가 증가하더라도 PM 응집체를 구성하는 단일 입자의 평균 직경은 유의미한 변화를 보이지 않았다. 반면 습도가 낮은 조건에서 포집된 PM의 단일 입자는 뚜렷한 구형태로 관찰되었지만 습도가 증가할수록 불분명한 형태로 변하는 것을 확인할 수 있었다.
2) PM 포집 환경의 상대 습도 증가는 PM 응집체의 프랙탈 기하학적 매개 변수에 영향을 줄 수 있다. 특히 화염 주변의 상대 습도가 43%에 도달한 경우 가지 분기 형태의 응집체를 구성하는 단일 입자 수가 증가하였으며, 상대 습도가 64%에 도달한 경우 D_f와 k_f가 동시에 커져 가지 분기 형태의 응집체 형상이 붕괴되어 더 큰 덩어리 형태로 전이되었다.
3) 라만 분광 해석을 통해 측정된 G, D 피크의 비(I_D/I_G, I_A/I_D)와 각각 피크를 구성하는 성분의 면적 비는 상대 습도의 변화에 거의 영향을 받지 않았고 이 결과로부터 PM의 탄소 결합 구조에 미치는 영향은 미미한 것으로 확인할 수 있었다.
4) 화염 주변의 높은 상대 습도 조건에서 포집된 PM은 전체 탄소 성분 중 친수성 OC 성분이 증가되었고 습식 성장을 통해 응집체의 응집 밀도가 높아지는 것을

확인하였다.

5) 결국 PM이 생성되는 화염 주변의 상대 습도는 응집체 형상 변화에는 크게 기여하지만 탄소 결합 구조에 미치는 영향은 미미하여 높은 습윤 환경에서 생성되는 PM의 경우 입사 광에 대해 광흡수 보다는 광산란의 영향이 지배적일 것이라는 결론을 내릴 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1F1A1067754).

References

[1] S. Tiwari, G. Pandithurai, S.D. Attri, A.K. Srivastava, V.K. Soni, D.S. Bisht, V. Anil Kumar, Manoj K. Srivastava, Aerosol optical properties and their relationship with meteorological parameters during wintertime in Delhi, India. Atmos. Res. 153 (2015) 465-479.

[2] Y. Li, Q. Chen, H. Zhao, L. Wang, R. Tao, Variations in PM10, PM2. 5 and PM1. 0 in an urban area of the Sichuan Basin and their relation to meteorological factors. Atmosphere 6(1) (2015) 150-163.

[3] G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Jan Oberdörster, Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. Environ. Health Perspect. 113(7) (2005) 823-839.

[4] Y. Bai, R. E. Brugha, L. Jacobs, J. Grigg, T. S. Nawrot, B. Nemery, Carbon loading in airway macrophages as a biomarker for individual exposure to particulate matter air pollution—A critical review. Environ. Int. 74 (2015) 32-41.

[5] H.O. Pörtner, D.C. Roberts, H. Adams, C. Adler, P. Aldunce, E. Ali, R. Ara Begum, R. Betts, R.B. Kerr, et al, Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. IPCC Sixth Assessment Report (2022).

[6] K.A. Fuller, W.C. Malm, S.M Kreidenweis, Effects of mixing on extinction by carbonaceous particles. J. Geophys. Res. Atmos. 104(D13) (1999) 15941-15954.

[7] C.M. Sorensen, Light scattering by fractal aggregates: a review. Aerosol Sci. Technol. 35(2) (2001) 648-687.

[8] V.A. Markel, V.M Shalaev, Absorption of light by soot particles in micro-droplets of water. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 63(2-6) (1999) 321-339.

[9] H. Eichler, Y.F. Cheng, W. Birmili, A. Nowak, A. Wiedensohler, E. Brüggemann, T. Gnauk, H. Herrmann, D. Althausen, A. Ansmann, R. Engelmann, M. Tesche, M. Wendisch, Y.H. Zhang, M. Hu, S. Liu, L.M. Zeng, Hygroscopic properties and extinction of aerosol particles at ambient relative humidity in South-Eastern China. Atmos. Environ. 42(25) (2008) 6321-6334.

[10] E. Weingartner, H. Burtscher, U. Baltensperger, Hygroscopic properties of carbon and diesel soot particles. Atmos. Environ. 31(15) (1997) 2311-2327.

[11] I.N. Tang, Thermodynamic and optical properties of mixed-salt aerosols of atmospheric importance. J. Geophys. Res. Atmos. 102(D2) (1997) 1883-1893.

[12] I.N. Tang, H.R. Munkelwitz, Water activities, densities, and refractive indices of aqueous sulfates and sodium nitrate droplets of atmospheric importance. J. Geophys. Res. Atmos. 99(D9) (1994) 18801-18808.

[13] H. Levy, M.D. Schwarzkopf, L. Horowitz, V. Ramaswamy, K.L. Findell, Strong sensitivity of late 21st century climate to projected changes in short-lived air pollutants. J. Geophys. Res. Atmos. 113(D6) (2008).

[14] D.T. Shindell, H. Levy, M.D. Schwarzkopf, L.W. Horowitz, J.F. Lamarque, G. Faluvegi, Multimodel projections of climate change from short-lived emissions due to human activities. J. Geophys. Res. Atmos. 113(D11) (2008).

[15] S.H. Lee, S.H. Park, Experimental Investigations of the Characteristics of the Length Variation of Kerosene-Oxygen Laminar Diffusion Flames. Fire Sci. Eng. 32(6) (2018) 22-27.

[16] J.G. Radney, R. You, X. Ma, J.M. Conny, M.R. Zachariah, J.T. Hodges, C.D. Zangmeister, Dependence of soot optical properties on particle morphology: measurements and model comparisons. Environ. Sci. Technol. 48(6) (2014) 3169-3176.

[17] M. Wozniak, F.R.A. Onofri, S. Barbosa, J. Yon, J. Mroczka, Comparison of methods to derive morphological parameters of multi-fractal samples of particle aggregates from TEM images. J. Aerosol Sci. 47 (2012) 12-26.

[18] C.A. Schneider, W.S. Rasband, K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat. Methods 9(7) (2012) 671-675.

[19] Ü.Ö. Köylü, G.M. Faeth, Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence

times. Combust. Flame 89(2) (1992) 140-156.
[20] R.K. Chakrabarty, H. Moosmüller, W.P. Arnott, M.A. Garro, G. Tian, J.G. Slowik, E.S. Cross, J.H. Han, P. Davidovits, T.B. Onasch, D.R. Worsnop, Low fractal dimension cluster-dilute soot aggregates from a premixed flame. Phys. Rev. Lett. 102(23) (2009) 235504.
[21] C. Arnas, C. Dominique, P. Roubin, C. Martin, C. Laffon, P. Parent, C. Brosset, B. Pégourié, Experimental study of different carbon dust growth mechanisms. J. Nucl. Mater. 337 (2005) 69-73.
[22] U. Koeylue, Y. Xing, D.E. Rosner, Fractal morphology analysis of combustion-generated aggregates using angular light scattering and electron microscope images. Langmuir 11(12) (1995) 4848-4854.
[23] A. Mita, K. Isono, Effective complex refractive index of atmospheric aerosols containing absorbing substances. J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II 58(1) (1980) 69-80.
[24] S.B. Singham, C.F. Bohren, Scattering of unpolarized and polarized light by particle aggregates of different size and fractal dimension. Langmuir 9(5) (1993) 1431-1435.
[25] A. Sadezky, H. Muckenhuber, H. Grothe, R. Niessner, U. Pöschl, Raman microspectroscopy of soot and related carbonaceous materials: Spectral analysis and structural information. Carbon 43(8) (2005) 1731-1742.
[26] H. Horvath, Atmospheric light absorption—A review. Atmos. Environ. A, Gen. Top. 27(3) (1993) 293-317.

저자정보

강별

강별은 조선대학교 기계시스템·미래자동차공학과 박사 과정이며, 관심 분야는 입자상 물질의 물리적&화학적 분석을 통한 광학 특성 연구이다.

박설현

박설현은 조선대학교 기계공학과 부교수로 재직 중이며, 관심 분야는 초소형 위성, 수소 최소 점화에너지 측정, 입자상 물질 광학 특성 연구이다.