

석탄의 연소과정에서 포집된 입자상 물질의 광학 특성에 관한 연구

A Study on Optical Properties of Particulate Matter Collected from Burning Coal

김무현* · 강별* · 박설현***

Moo-Hyun Kim*, Byeol Kang* and Seul-Hyun Park***

(Received 29 November 2022, Revision received 14 December 2022 Accepted 14 December 2022)

Abstract : In order to improve the reliability of optical-based PM concentration measurements, the optical properties of PM such as the dimensionless light extinction coefficient must be well defined. However, the optical properties of PM produced from burning coal are lacking. Therefore, in this study, the dimensionless light extinction coefficient measurements and optical characterization analysis of PM generated from burning bituminous coal at elevated reaction temperatures were performed. Bituminous coal in the form of powder was burned in a muffle furnace and PM released from flame was then collected on a quartz filter. Morphological investigations through the TEM images and elemental and organic carbon ratio analysis were performed to quantitatively investigate the optical properties of PM. Experimental results clearly indicate that increases in the reaction temperature can increase graphitic nature and morphological dimension (represented by an optical diameter) of PM, eventually enhancing the effects of absorption and scattering of the light and the measured dimensionless light extinction coefficient of PM.

Key Words : Bituminous Coal, Particulate Matter, Dimensionless Light Extinction Coefficient, Scattering, Absorption

— 기호 설명 —

K_e : 무차원 광소멸계수
 I : 레이저의 투과광
 I_0 : 레이저의 입사광
 L_f : 화염 길이

1. 서 론

입자상 물질(Particulate Matter, PM)은 대기 중의 고체 입자와 액체 입자의 혼합물로 먼지, 물방울, 그을음과 같은 입자들이 해당된다.¹⁾ PM은 크기에 따라 PM2.5, PM10으로 분류할 수 있고, 1차 및 2차 입자로도 구분이 가능하다. 1차 입자의 경

*** 박설현(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8852-0016) : 교수, 조선대학교 기계공학과
E-mail : isaac@chosun.ac.kr, Tel : 062-230-7174
*김무현(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8592-3928),
*강별(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0901-6936) : 대학원생, 조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과

*** Seul-Hyu Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8852-0016) : Professor, Department of Mechanical Engineering, Chosun University.
E-mail : isaac@chosun.ac.kr, Tel : 062-230-7174
*Moo-Hyun Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-8592-3928),
*Byeol Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-0901-6936) : Graduate student, Department of Mechanical System& Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University.

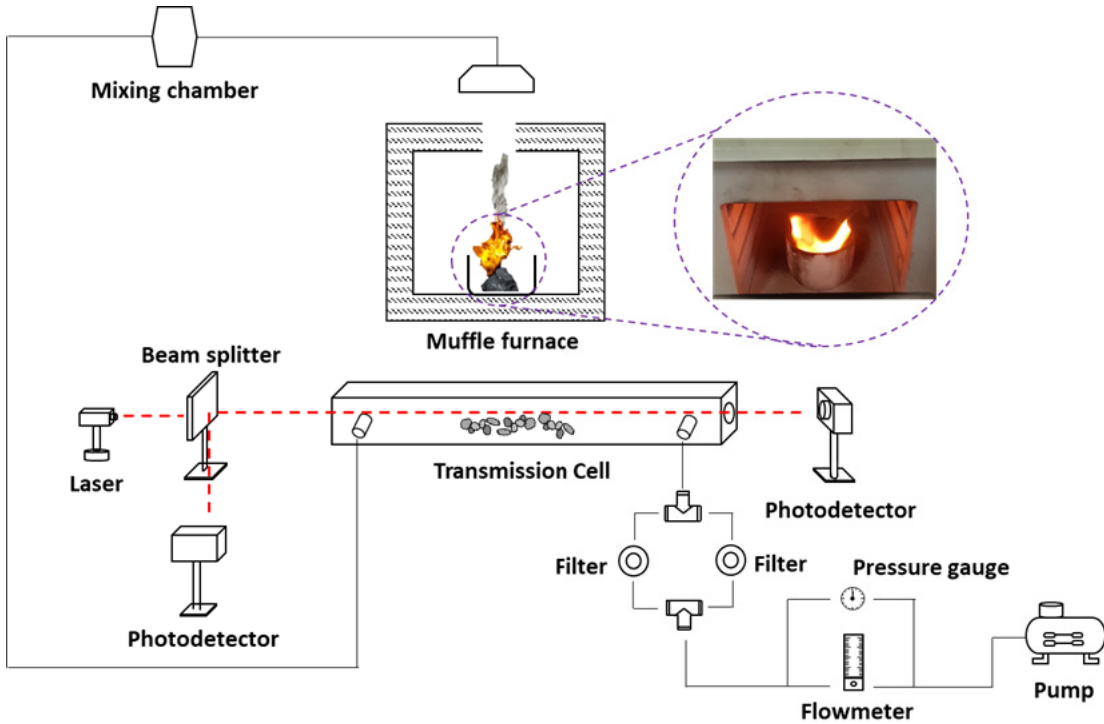


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

우 마찰, 바람, 화석 연료 연소에 의해 생성된다. 2차 입자의 경우, 대기 중에서 산성 물질 및 염의 화학 반응으로 형성된다.²⁾ 석탄 연소 후 발생하는 대기오염물질은 탈황 및 탈진 설비와 집진 설비를 거쳐 포집되지만³⁾ 석탄 화력발전소는 1차 입자의 주발생원으로 거론되고 있다. 2020년 기준 국내 화력 발전의 경우, 전체 에너지 발전 비율의 44%를 책임지고 있으며,⁴⁾ 단기간에 화력 발전을 대체할 에너지 공급원을 찾기는 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서 화력 발전 시 필연적으로 배출되는 PM과 배기가스에 대한 측정 및 저감에 관한 연구도 필수적으로 수반되어야 한다. 석탄 화력발전소에서 배출되는 1차 입자는 대기 중 존재하는 응축성 PM과 다르게 필터를 이용하여 포집하는 중력 농도법으로 측정하기 어렵고 실시간 모니터링 및 측정이 쉽지 않아 대안 기술 개발을 위한 기초 연구가 필요하다.

일반적으로 연소 및 에어로졸 분야에서 입자상 물질의 측정은 광학식 기반의 기술을 사용한다.⁵⁾

광학식 기반 측정법은 실시간 측정이 가능한 장점이 있지만 측정 물질의 광학 특성 계수가 요구된다. 이때 광학 특성 계수는 연소 조건이나 연료의 종류와 관계없이 상숫값을 사용하기 때문에 비교적 낮은 신뢰성이 문제점으로 대두될 수 있다.

화력발전소의 굴뚝을 통해 배출되는 PM의 광학식 농도 측정 방식의 특성상 광원과 광검출기의 경로가 상대적으로 길고, PM 입자에 의한 산란 효과가 큰 특성으로 인해 광소멸법에 의한 농

Table 1 Composition analysis of fuel

Proximate analysis		Elementary analysis	
Moisture	5.04	C	67.49
Volatile matter	36.55	H	4.75
		N	1.26
Fixed Carbon	50.39	S	0.33
Ash	8.02	O	26.17

도 측정 방식이 일반적이다. 광소멸법을 적용하여 광원과 광검출기 사이의 경로 상에 존재하는 입자의 농도를 측정하기 위해 필요한 광학 특성 계수가 무차원 광소멸계수(Dimensionless light extinction coefficient)이다. 하지만 무차원 광소멸계수는 연료 및 연소 환경에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있다. 이와 관련하여 메탄, 에틸렌, 등유의 확산 화염에서 발생하는 그을음에 대해 화염 높이별 무차원 광소멸계수를 측정하는 연구와⁶⁾ 아세틸렌과 공기 예혼합에서 발생한 그을음에 대한 무차원 광소멸계수 측정⁷⁾ 등 다양한 연료, 층류 및 난류 확산 화염의 조건에서 그을음의 무차원 광소멸계수를 광원의 파장에 대해 설정하는 연구가 진행되었다.⁸⁻¹⁴⁾

그러나 석탄을 대상으로 한 광학 특성 및 무차원 광소멸계수 측정에 관한 연구는 비교적 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 석탄 화력발전소에서 사용되는 역청탄을 대상으로 서로 다른 반응 온도에서 생성되는 PM의 무차원 광소멸계수를 측정하여 제시하고 광학 특성을 분석하고자 하였다. PM 입자의 광학 특성 분석을 위해서 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)을 이용하여 입자의 물리적 형상을 측정하였고, 아울러 원소 탄소(Elemental Carbon, EC) & 유기 탄소(Organic Carbon, OC) 비를 통한 화학적 분석도 수행하였다. 본 논문을 통해 제시된 PM의 광특성화 정보는 석탄 연소과정에서 발생하는 PM 광학식 농도 측정의 정확도 및 신뢰도 향상에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 장치 및 방법

PM 생성에는 실제 석탄 화력발전소에서 취급하는 역청탄(Bituminous coal)을 공급받아 사용하였으며, 공업 분석(Proximate analysis) 및 원소 분석(Elementary analysis) 결과를 Table 1에 정리하였다. 석탄 연소의 경우, Labhouse 社의 DMF-3T 머플로(Muffle furnace)를 이용하였다. 원탄 형태의 역청탄을 그라인더를 이용해 파우더 형태로 만들고 도가니 안에 약 20 g 정도를 채워 머플로에서

자연발화시켰다. 사전 테스트를 통해 자연발화가 가능한 최저 온도를 확인 후 실험 온도를 설정하였다. 머플로의 온도는 각각 550, 600, 650℃로 설정하였다.

본 연구에서 PM의 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해 GSLE(Gravimetric Sampling and Light Extinction) 장치를 적용하였으며, 자세한 실험 장치 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. GSLE 장치는 광학식 및 중량법으로 PM 농도를 측정할 수 있도록 구성되어 있다. Transmission Cell(TC)은 0.8 m × 0.08 m × 0.08 m의 직육면체 형태 알루미늄으로 제작되었으며, 내부에는 무광 흑색 페인트를 도포하여 빛의 반사나 산란을 억제할 수 있도록 하였다. 그리고 레이저 광이 투과될 수 있도록 지름 8 mm의 광학 창(BK7 window with anti-reflection coating)을 양 끝단에 장착하였다. 또 TC 하단부에는 밴드 히터를 설치하여 열영동(Thermophoresis) 효과에 의해 PM이 침착하는 것을 방지하였다.¹⁵⁾ 머플로에서 연소되어 배출된 PM은 진공펌프에 의해 TC로 흡입되는 공기와 혼합되어 유입되고 650 nm 레이저 광에 노출되어 광흡수와 광산란을 일으킨다. TC를 통과한 PM은 석영 섬유 필터에 포집된다.

TC를 통과한 레이저 광의 강도는 PM에 의한 광흡수와 광산란의 영향으로 Fig. 2에서와 같이 광소멸이 일어나게 되며, 이로 인해 측정된 광투과율(I/I_0)은 급격히 감소하게 된다.

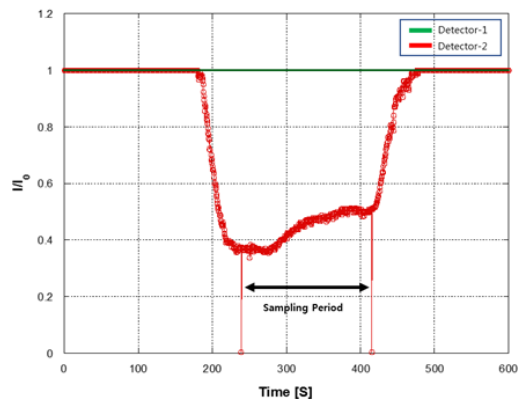


Fig. 2 Measured light transmittance through the TC as a function of time

Fig. 2에 도시된 결과에서 볼 수 있듯이 PM과 혼합된 공기가 TC 내부에 유입되기 전과 PM 유입이 중단되어 공기만 TC로 유입되는 동안 측정된 광투과율은 일정한 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 광투과율 측정 전후에 TC 내부에 잔류하는 PM이 없어 입사광이 소멸되지 않기 때문이며, 광투과율 값이 1을 유지하는 결과를 바탕으로 광원과 광검출기에 대한 응답 안정성(Stability)을 검증하였다. PM이 TC 내부로 유입되기 시작하면 그 직후부터 광투과율은 급격히 감소하여 준 정상상태(Quasi-steady state)에 도달하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 무차원 광소멸계수 측정 방법

입자에 의한 광소멸은 Fig. 3과 같이 입사광이 진행하는 경로 상에 존재하는 입자의 형상과 화학적 특성에 의해 흡수되거나 산란되어 줄어드는 현상으로, 입자의 굴절지수(Refractive index)에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁶⁾

Bouguer law에 따라 무차원 광소멸계수와 광투과율의 관계를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁶⁾

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-K_e \frac{f_v}{\lambda} L) \quad (1)$$

식 (1)에서 K_e 는 무차원 광소멸계수, f_v 는 광학적으로 측정된 PM의 농도, λ 는 광원의 파장 길이, L 은 레이저의 경로의 길이를 의미한다. 또한

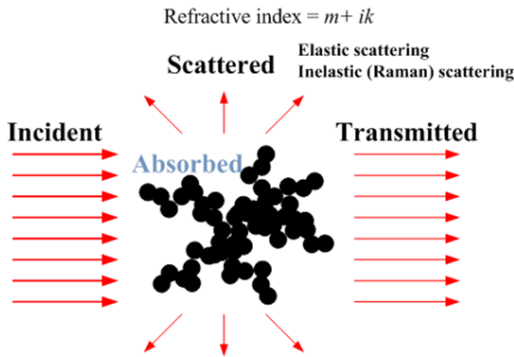


Fig. 3 Light extinction process by PM

필터에 포집된 PM의 농도인 f_{vg} 는 식 (2)를 이용해서 계산할 수 있다.

$$f_{vg} = \frac{m}{Vt\rho} \quad (2)$$

식 (2)에서 m 은 필터에 채집된 PM의 질량, V 는 PM 포집 시간 동안 TC 내부에 유입된 공기의 유량, t 는 포집 시간, ρ 는 PM의 밀도이다. PM의 밀도는 선행연구를 통해 구해져 인용되는 1.74 g/cm^3 을 적용하였다.¹⁷⁾

광학적 방법으로 측정된 PM의 농도와 필터에서 채집한 PM의 농도는 같은 포집 구간에서 측정했기 때문에 서로 같아야 하며, 이 관계를 적용하면 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$f_v = f_{vg} = -\frac{\lambda \ln(\frac{I}{I_0})}{K_e L} \quad (3)$$

식 (3)을 무차원 광소멸계수에 대해 정리하면 최종적으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_e = -\frac{V\rho\lambda \ln(\frac{I}{I_0})}{Lm} \quad (4)$$

3.2 무차원 광소멸계수 측정결과 및 불확실성

Fig. 4는 각각의 반응 온도에서 생성된 역청탄의 PM 무차원 광소멸계수를 도시한 결과이다. 머플로의 반응 온도가 550, 600, 650°C에서 발생한 PM의 무차원 광소멸계수는 각각 8.42, 8.69, 9.11로 온도가 증가함에 따라 무차원 광소멸계수도 커지는 것을 확인하였다. 무차원 광소멸계수의 증가는 입자에 의한 광소멸량(산란과 흡수의 영향)이 증가했음을 의미한다. 측정된 무차원 광소멸계수(K_e)의 불확실성은 Coleman 및 Steele과 Taylor 및 Kuyatt이 제시한 식을 이용하여 계산하였다.^{18,19)} 무차원 광소멸계수를 계산하기 위해 필요한 측정 항목의 개별 불확실성을 확장하면 표준 측정 불확실성은 식 (5)와 같이 표현할 수 있고, 식에 포함되는 개별 측정 변수는 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Parametric uncertainty for calculating type B uncertainty

Source S	$\frac{\partial K_e}{\partial S}$	$\frac{S}{K_e} \cdot \frac{\partial K_e}{\partial S}$	Components of Uncertainty in S	$\frac{\partial S}{S}$
λ	$\frac{-\rho_{soot} V_{gas} \ln \frac{I}{I_0}}{L m_{soot}}$	1	Laser specs ±20 nm	0.031
ρ_{soot}	$\frac{-\lambda V_{gas} \ln \frac{I}{I_0}}{L m_{soot}}$	1	Literature and Current Study 0.08 g/cm ³	0.046
V_{gas}	$\frac{-\lambda \rho_{soot} \ln \frac{I}{I_0}}{L m_{soot}}$	1	Accuracy ±0.4% FS Resolution ±0.001 L/min	0.004
L	$\frac{-\lambda \rho_{soot} V_{gas} \ln \frac{I}{I_0}}{L^2 m_{soot}}$	-1	0.008 m	0.010
m_{soot}	$\frac{-\lambda \rho_{soot} V_{gas} \ln \frac{I}{I_0}}{L m_{soot}^2}$	-1	Resolution 0.2 mg	0.036
$\frac{I}{I_0}$	$\frac{-\lambda \rho_{soot} V_{gas}}{L m_{soot}} \cdot \frac{I_0}{I}$	$\frac{1}{\ln \frac{I}{I_0}}$	0.928028	0.023
			Total Uncertainty (%)	7.1 %
$\frac{\delta K_e}{K_e} = \sqrt{(0.031)^2 + (0.046)^2 + (0.004)^2 + (-1 \cdot 0.01)^2 + (-1 \cdot 0.036)^2 + \left(\frac{1}{\ln 0.39} \cdot 0.02331\right)^2}$				

$$\frac{\delta K_e}{K_e} = \sqrt{\sum_n \left[\frac{S_n}{K_e} \cdot \frac{\partial K_e}{\partial S_n} \cdot \frac{\delta S_n}{S_n} \right]^2} \quad (5)$$

식 (5)에서 δK_e 는 측정된 K_e 에 대한 총 불확실성, S_n 은 n번째 소스와 연관된 매개변수, δS_n 은 매개변수의 불확실성이며, 식 (5) 통해 최종 계산된 총 불확실성은 7.1%이다.

3.3 PM의 광학 특성

무차원 광소멸계수의 측정 결과로부터 서로 다른 반응 온도에서 포집된 역청탄 PM의 광흡수와 광산란의 특성이 조건별로 서로 상이할 수 있음을 확인하였다. 탄소 성분이 주를 이루는 1차 생성 PM 입자의 광학 특성은 광원의 파장 이외에 입자의 탄화도와 물리적 형상에 의해 큰 영향을 받을 수 있는 것으로 잘 알려져 있다.²⁰⁾

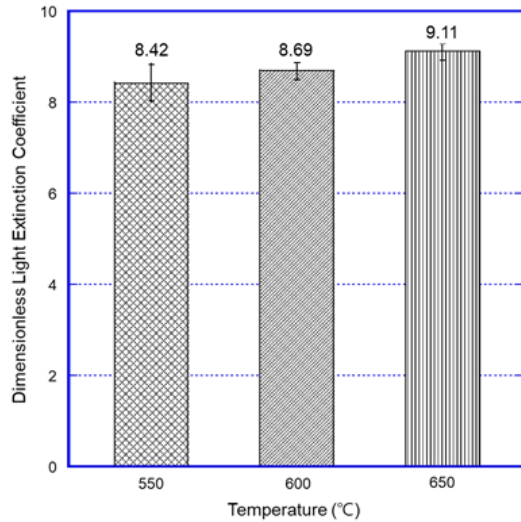


Fig. 4 Measured dimensionless light extinction coefficient of PM

연소 과정에서 발생하는 1차 생성 PM은 주로 탄소 성분으로 이루어져 있고, 탄소 성분은 탄화도(Graphitic degree)에 따라 EC와 OC로 구분될 수 있다. EC는 검은 탄소(Black Carbon, BC) 또는 흑연화 탄소라고 불리고 그래핀과 가까운 탄소 배열 구조로 되어 있다. 이에 반해 OC는 탄화수소와 산소 화합물의 혼합물로 연소를 통해 입자 상태로 직접 배출되거나, 광화학 반응을 통해 대기 중 2차 유기 에어로졸과의 결합을 통해 생성될 수 있다. 이때 입자에 의한 광흡수는 대부분 탄화도가 높은 EC 또는 EC를 포함한 입자에 의해 발생한다.²¹⁾ Fig. 5에는 온도별 역청탄 PM의 OC와 EC 비율을 도시한 그래프이다. 반응 온도가 550°C인 경우, OC 및 EC 비율이 각각 0.43, 0.57로 EC 비율이 약간 높았지만 거의 유사한 비율로 구성되어 있었다. 그러나 600°C로 온도가 증가함에 따라 OC가 0.19로 56% 감소하고 EC가 0.81로 42% 증가하였다. 650°C에서는 OC와 EC가 각각 0.80, 0.20으로 600°C와 거의 동일했다. 이 결과로부터 탄소의 탄화도에 영향을 주는 반응 온도의 경계가 약 600°C 근처임을 예상해 볼 수 있다.

EC 비율의 증가는 반응 주변 온도 증가로 인한 화염 길이 영향과 1차 생성 PM의 발생 과정을 통해 설명할 수 있다. 확산 화염의 길이(L_f)는 식 (6)에 제시된 파라미터와 상관성을 가지며, PM 성장과 밀접한 관련이 있는 체류 시간에 영향을 미칠 수 있다.²²⁾

$$L_f = \frac{Q_F(T_\infty/T_f)^{0.67}}{4\pi D_\infty \ln(1+1/s)} \quad (6)$$

식 (6)에서 Q_F 는 연료의 유량, T_∞ 는 주변 온도, T_f 는 화염 온도, D_∞ 는 산소-불활성 가스 간 확산계수, s 는 이론 공연비를 의미한다.

식 (6)을 통해 유추해 볼 수 있는 바와 같이 반응 온도 상승으로 인한 화염 주위 온도 상승은 화염 길이를 증가시킬 수 있다. 화염 길이가 증가하는 경우, 화염 면을 따라 생성된 탄소 핵이 반응할 수 있는 체류 시간도 함께 증가한다. 연료가 공급된 버너 팁 근처의 화염 하단에서 열분해를

통해 생성된 단일 방향족 고리인 벤젠과 페닐은 HACA(Hydrogen Abstraction Acetylene Addition) 메커니즘을 통해 PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)로 성장한다. 생성된 PAH의 질량이 일정 수준에 도달하게 되면 결정화가 일어나게 되는데 반응 온도가 고온인 경우, 탄소 핵(Carbonization)의 생성 및 성장이 가속화되어 탄화도가 상대적으로 높은 EC의 비중이 커지는 반면, 반응 온도가 낮은 경우, PAH의 응축이나 중합결합(Polymerization)을 통해 탄화도가 낮은 OC 형태로 성장하게 된다.

아울러 화염의 길이가 길어지면 화염 면의 고온에 노출되어 탄소 핵 표면에서 HACA 반응에 필요한 충분한 시간(체류 시간)을 확보할 수 있어 탄화도를 높이고 EC의 비중을 높이면서 더 큰 입자로 성장할 수 있다. 선행 연구의 결과에 따르면, 탄화수소계 연료의 층류 확산 화염에서 발생한 PM은 화염 길이가 길어질수록 탄화도가 낮은 무정형 탄소 결합 구조에서 탄화도가 높은 흑연화 결합 구조로 성장하는 것으로 보고되고 있으며,²³⁾ 본 논문에서 제시하고 있는 결과와도 일치하는 경향을 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 PM에 탄화도가 높은 EC의 비중이 높은 경우, 빛을 흡수하는 성질이 강하여 반응 온도가 높은 조건에서 생성된 PM일수록 광흡수 특성이 증가할 것으로 판단할 수 있다.

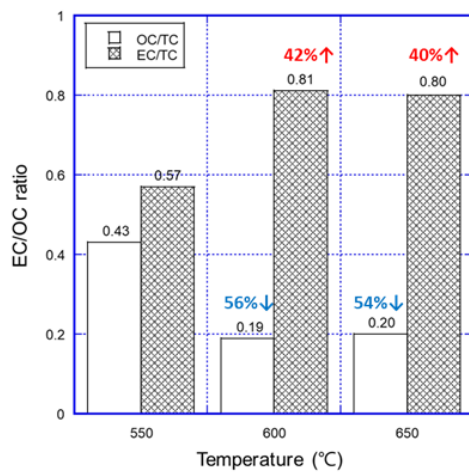


Fig. 5 Measured EC/OC ratio of PM collected at elevated reaction temperatures

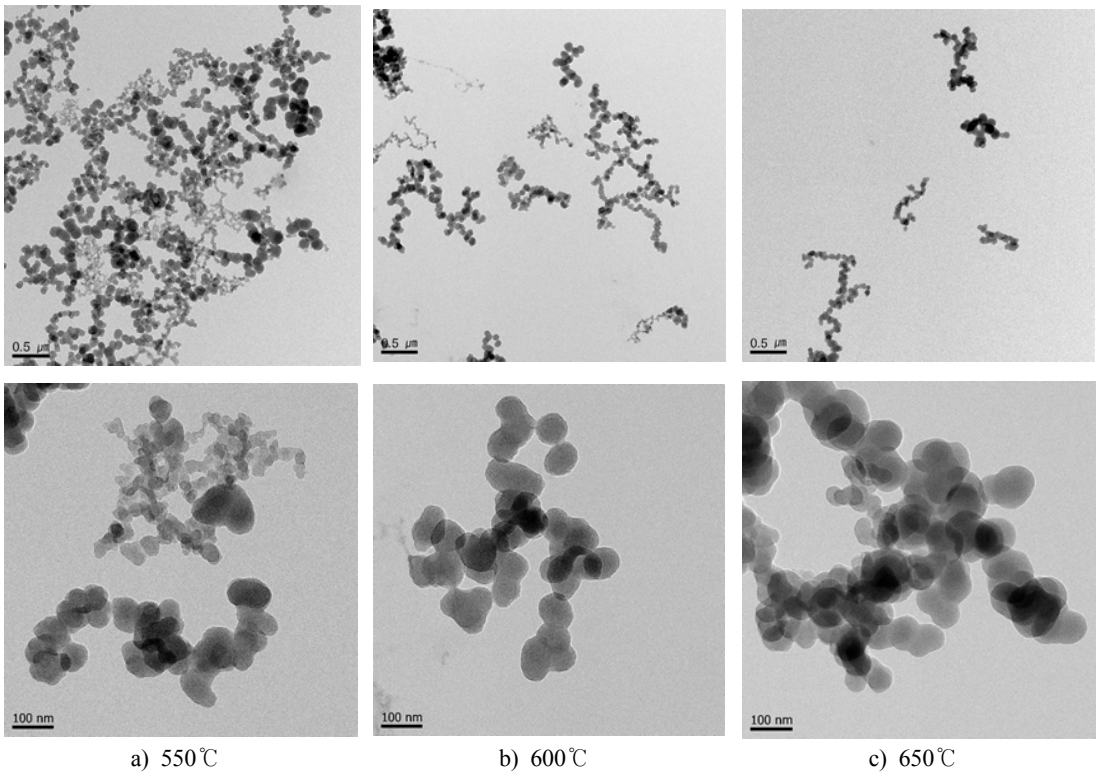


Fig. 6 TEM image of PM agglomerate collected under difference reaction temperatures

PM의 대표적인 광학 특성 중 광산란은 입자의 물리적 형상에 의해 큰 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 역청탄 PM의 물리적 형상에 대한 정보를 획득하기 위해 투과 전자 현미경을 이용하여 획득된 이미지를 분석하여 입자의 크기와 형상을 측정하였다. Fig. 6은 서로 다른 반응 온도에서 포집된 역청탄 PM의 TEM 원본 이미지이다. 입자의 형태 및 형상의 특징을 정성적으로 비교할 수 있도록 저배율부터 고배율까지의 이미지를 획득하였다. 응집체들의 형상을 비교했을 때 육안 상으로 큰 차이는 관찰되지 않았고, 550°C 조건에서 PM이 많아 보이는 것은 TEM 분석 전처리 과정의 분산 정도가 다른 것으로 연소 환경에 의한 PM의 특징은 아닌 것으로 판단된다. 하지만 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 PM 응집체 단일 입자의 경우, 모든 온도 조건에서 비교적 뚜렷한 구형 태를 띠고 있는 것으로 관찰되었다.



Fig. 7 Measurement of morphological parameter

Table 3 Result of morphology parameter

Temperature [°C]	dp [nm]	xp [nm]	L [nm]	Aa [nm ²]
550	51.43	0.25	554.11	85439
600	89.74	0.43	647.00	135162
650	95.96	0.46	757.18	244697

2차원 TEM 이미지로부터 PM 응집체의 물리적 형상을 정량적으로 분석하기 위해서 디지털 이미징 프로세싱 기법을 이용하였다. Fig. 7에서와 같이 배경 노이즈를 감소시키고, 응집체의 이진 반전 이미지(Inverted binary image)로부터 입자 직경(d_p) 및 응집체 최대 길이(L), 투영 면적(A_a)을 측정하고 자세한 결과는 Table 3에 정리하였다.

반응 온도가 증가함에 따라 평균 입자 직경이 51.43 nm에서 95.96 nm로 약 2배 가까이 증가했으며, 응집체 최대 길이 또한 554.11 nm에서 757.18 nm로 증가하였다. 평균 입자 직경이 증가하면서 광학 직경 또한 0.25 nm에서 0.46 nm로 증가했으며, 응집체 최대 길이 증가에 따라 투영 면적도 85439 nm²에서 244697 nm²로 증가하였다. 평균 단일 입자 직경 및 응집체 형상 증가로 인한 광산란 영향의 증가를 예상해 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 반응 온도에서 발생한 역청탄 PM의 무차원 광소멸계수를 측정하고 물리적 및 화학적 분석을 통해 광학적 특성을 비교 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 반응 온도가 증가함에 따라 측정된 역청탄 PM의 무차원 광소멸계수도 각각 8.42, 8.69, 9.11로 증가하였다.

2) PM 생성 시 반응 온도의 증가는 PM 단일 입자 직경과 응집체의 물리적 형상에 영향을 미치고 온도가 높아질수록 단일 입자의 직경은 최대 44.53 nm 증가하였다.

3) 반응 온도의 상승은 PM의 탄화도와 체류 시간을 증가시켜 EC의 비율을 증가시키고, 본 연구

에서 확인된 탄화도 증가 한계 온도는 약 600°C로 확인되었다.

4) 결과적으로 PM 생성 시 반응 온도의 증가는 단일 입자 직경의 증가로 인한 광산란 영향과 EC 비율 증가의 광흡수 영향을 증가시켜 역청탄 PM의 무차원 광소멸계수를 높이는 것으로 판단된다.

후 기

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

Author contributions

M. H. Kim; Writing-original draft, Formal analysis. B. Kang; Writing-original draft, Software. S. H. Park; Conceptualization, Supervision, Writing-review & editing, Validation.

References

1. U. S. EPA, 2001, "United States environmental protection agency", Quality Assurance Guidance Document-Model Quality Assurance Project Plan for the PM Ambient Air, 2, 12.
2. K. Mohapatra, and S. K. Biswal, 2014, "Effect of particulate matter (PM) on plants, climate, ecosystem and human health", Int J Adv Technol Eng Sci, Vol. 2, No. 4, pp. 2348-7550.
3. S. H. Kang, H. E. Song and Y. C. Ahn, 2020, "A study on the water spray system for coal dust reduction considering internal flow by belt operation", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 24, No. 3, pp. 14-22. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2020.24.3.014>)
4. Korea Energy Economics Institute, 2021, Yearbook of Energy Statistics. Date up to 2020.
5. A. M. Irrera, 2002, "Measurement of

- Dimensionless Extinction Constant for Soot Produced from Various Liquid Fuels", Doctoral dissertation, Drexel University, Philadelphia, USA.
6. T. C. Williams, C. R. Shaddix, K. A. Jensen and J. M. Suo-Anttila, 2007, "Measurement of the dimensionless extinction coefficient of soot within laminar diffusion flames", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, Issue 7-8, pp. 1616-1630.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.024>)
 7. Z. Q. Zhou, T. U. Ahmed, and M. Y. Choi, 1998, "Measurement of dimensionless soot extinction constant using a gravimetric sampling technique", *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 18, No. 1, pp. 27-32.
([https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(98\)10005-5](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(98)10005-5))
 8. J. S. Wu, S. S. Krishnan and G. M. Faeth, 1997, "Refractive indices at visible wavelengths of soot emitted from buoyant turbulent diffusion flames", pp. 230-237.
(<https://doi.org/10.1115/1.2824213>)
 9. G. W. Mulholland, and M. Y. Choi, 1998, "Measurement of the mass specific extinction coefficient for acetylene and ethene smoke using the large agglomerate optics facility", In *Symposium (international) on combustion*, Vol. 27, No. 1, pp. 1515-1522.
([https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(98\)80559-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(98)80559-6))
 10. J. Zhu, M. Y. Choi, G. W. Mulholland and L. A. Gritzo, 2000, "Measurement of soot optical properties in the near-infrared spectrum", *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 43, No. 18, pp. 3299-3303.
([https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00382-8](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00382-8))
 11. S. S. Krishnan, K. C. Lin and G. M. Faeth, 2000, "Optical properties in the visible of overfire soot in large buoyant turbulent diffusion flames", *J. Heat transfer*, Vol. 122, No. 3, pp. 517-524.
(<https://doi.org/10.1115/1.1288025>)
 12. J. Zhu, M. Y. Choi, G. W. Mulholland, S. L. Manzello, L. A. Gritzo and J. Suo-Anttila, 2002, "Measurement of visible and near-IR optical properties of soot produced from laminar flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 29, Issue 2, 2367-2374.
([https://doi.org/10.1016/S1540-7489\(02\)80288-7](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80288-7))
 13. J. F. Widmann, J. C. Yang, T. J. Smith, S. L. Manzello and G. W. Mulholland, 2003, "Measurement of the optical extinction coefficients of post-flame soot in the infrared", *Combustion and Flame*, Vol. 134, Issue 1-2, 119-129.
([https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(03\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(03)00089-0))
 14. J. Zhu, A. Irrera, M. Y. Choi, G. W. Mulholland, J. Suo-Anttila and L. A. Gritzo, 2004, "Measurement of light extinction constant of JP-8 soot in the visible and near-infrared spectrum", *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, Issue 17-18, pp. 3643-3648.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.04.013>)
 15. J. H. Choi et al., 2016, "Characterization of carbonaceous particulate matter emitted from marine diesel engine", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 2011-2017.
(<https://doi.org/10.1007/s12206-016-0407-z>)
 16. S. C. Choi, 2009, "Measurement and analysis of the dimensionless extinction constant for diesel and biodiesel soot: influence of pressure, wavelength and fuel-type", Doctoral dissertation, Drexel University, Philadelphia, USA.
 17. M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins and T. Kashiwagi, 1995, "Comparisons of the soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques", *Combustion and Flame*, 102(1-2), 161-169.
([https://doi.org/10.1016/0010-2180\(94\)00282-W](https://doi.org/10.1016/0010-2180(94)00282-W))

18. W. Coleman and W. Steele, 1999, *Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers* 2nd New York.
19. B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, 1994, "Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results, Vol. 1297, Gaithersburg, MD: US Department of Commerce", Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
20. J. G. Radney, R. You, X. Ma, J. M. Conny, M. R. Zachariah, J. T. Hodges and C. D. Zangmeister, 2014, "Dependence of soot optical properties on particle morphology: measurements and model comparisons", *Environmental science & technology*, Vol. 48, No. 6, pp. 3169-3176. (<https://doi.org/10.1021/es4041804>)
21. H. Horvath, 1993, "Atmospheric light absorption -A review", *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, Vol. 27, Issue 3, pp. 293-317. ([https://doi.org/10.1016/0960-1686\(93\)90104-7](https://doi.org/10.1016/0960-1686(93)90104-7))
22. F. G. Roper, 1977, "The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I. Theoretical model", *Combustion and Flame*, Vol. 29, pp. 219-226. ([https://doi.org/10.1016/0010-2180\(77\)90112-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(77)90112-2))
23. C. R. Shaddix, Á. B. Palotás, C. M. Megaridis, M. Y. Choi and N. Y. Yang, 2005, "Soot graphitic order in laminar diffusion flames and a large-scale JP-8 pool fire", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, Issue 17, pp. 3604-3614. (<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.03.006>)