**〈**학술논문**〉** 

ISSN 1226-0959 eISSN 2466-2089

# Jet A1-공기 확산 화염에서 배출된 입자상 물질의 광학 및 형상학적 분석에 관한 연구

강별<sup>\*</sup>·류명호<sup>\*\*</sup>·박설현<sup>\*\*\*†</sup>

\*조선대학교 대학원 기계시스템·미래자동차공학과, \*\*한국폴리텍대학 광주캠퍼스 스마트전기자동차과, \*\*\*조선대학교 기계공학과

## An Analysis of Optical and Morphological Properties of Particulate Matters Emitted from Jet A1-air Diffusion Flames

Byeol Kang<sup>\*</sup>, Myung-Ho Ryu<sup>\*\*</sup> and Seul-Hyun Park<sup>\*\*\*†</sup>

\*Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering, Graduate School of Chosun University \*\*Dept. of Smart Electric Automobile, Korea Polytechnic Gwangju Campus \*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Chousn University

(Received 8 December 2023, Received in revised form 8 December 2023, Accepted 13 December 2023)

#### ABSTRACT

Many aircraft and launch vehicles that use Jet A1 as a fuel operate at high altitudes and emit large amounts of particulate matter into the atmosphere. The impact of particulate matter is steadily increasing and requires continuous monitoring and source reduction efforts. Morphological and optical characterization data of PM can be used in concentration measurement and reduction techniques to help quantitatively analyze the damage caused by PM. In this study, dimensionless light extinction coefficient measurements and morphological analysis of PM produced from burning Jet A1 in a coaxial flow burner were performed. The values of fractal dimension and prefactor which can help to quantify the morphological properties of the aggregates of Jet A1 PM, were found to be 1.68 and 2.85, respectively. The scattering albedo value estimated from the morphological properties was 0.094, indicating that the contribution of scattering to the total extinction was about 10%. The results were strongly supported by the fact that the fraction of elemental carbon (EC) composed of PM is dominant compared to organic carbon (OC). These empirical results highlighted that the light extinction by Jet A1 PM was dominated by the effects of light absorption rather than those of light scattering.

Key Words : Kerosene, Dimensionless light extinction coefficient, Scattering albedo

## 1. 서 론

탄화수소계 연료의 연소과정에서 발생하는 입자상 물 질(Particulate Matter, PM)은 유해한 영향으로 인해 사회 적 관심이 급증하고 있다. 대기 중의 부유하는 입자상 물 질은 지구 온난화와 시정장애 등의 환경 문제뿐 아니라 인 체에 흡수될 경우 호흡 질환, 심혈관 및 신경계 이상을 유 발할 수 있다[1-4]. 이러한 이유로 인해 입자상 물질 발생 원에서는 농도 측정을 위한 지속적인 모니터링과 배출 저 감을 위한 노력이 수반되어야 한다.

최근 성공적으로 발사되어 2025년 제4차 발사를 앞둔 한 국형 발사체-II (Korea Space Launch Vehicle-II, KSLV-II) 도 발사과정에 다량의 입자상 물질을 배출한다. Fig. 1과 같이 한국형 발사체의 고압 터빈을 구동시키기 위해 작동 하는 가스발생기에서 등유 계열 항공유를 연소시키면서 다량의 입자상 물질을 배출한다[5].

발사체나 항공기와 같이 상대적으로 높은 고도의 대기 에 입자상 물질을 배출하는 경우 입자에 의한 광산란과 광 흡수의 현상이 대기의 온난화와 냉각에 직접적으로 영향 을 미칠 수 있는 것으로 잘 알려져 있다[7]. 따라서, 항공유

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup>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.

의 연소과정을 통해 대기 중에 배출되는 입자상 물질의 광 산란 및 광흡수 특성 분석은 기후 변화 대응을 위해 필수적 으로 수행되어야 하는 연구 분야 중 하나이다. 입자상 물 질에 의한 광산란 및 광흡수의 영향을 정량적으로 파악하 기 위해서는 입자상 물질의 형태학적 및 화학적 분석이 필 수적이다. 입자에 의한 광산란-광흡수와 형태학적 특성을 고려하기 위해서 자주 사용되는 정량적 지표는 단위 질량 당 광소멸계수(Mass specific light extinction coefficient) 나 무차원 광소멸계수(Dimensionless light extinction coefficient)이며, 이와 관련된 다양한 연구들이 수행된 바 있다[8-14].

Acetylene, Ethene과 같이 상대적으로 가벼운 탄화수소 계 기체연료의 단위 질량당 광소멸계수는 당량비, 연소 압 력, 화염의 형태 등과 같은 연소 조건에 따라 다소 상이하 지만 동일한 광원의 파장 대역에서 대략 3 ~ 9 m<sup>2</sup>/g의 값 을 갖는 것으로 알려져 있다[10-11]. 이에 반해 디젤, 바이 오 디젤, JP 8과 같이 상대적으로 무거운 탄화수소계 액체 연료의 단위 질량당 광소멸계수는 훨씬 큰 값을 갖는 것으 로 보고되고 있다[14].

이와 같이 탄화수소계 연료의 연소과정을 통해 배출된 입자상 물질의 광소멸계수는 연료의 C/H 비율에 따라 달 라지는 경향이 강해 연료별로 고유한 특성을 갖는다. 따라 서 광소멸법을 이용하여 화염 내부나 화염에서 배출되는 입자상 물질의 농도를 정량적으로 측정하기 위해서는 연 료별 서로 상이한 광소멸계수를 고려해야 측정 오차를 최 소화할 수 있다.

앞서 기술한 바와 같이 탄화수소계 연료의 C/H 비에 따 라 달라질 수 있는 입자상 물질의 광소멸 특성을 고려할 때, 다양한 산업 현장과 연구 환경에서 사용되는 연료를 대상으로 연소과정 중에 배출되는 입자상 물질의 광특성 화 연구가 절실한 실정이다. 특히 본 연구의 대상 연료인 Jet A1의 경우 한국형 발사체는 물론 항공기에 사용되는



Fig. 1. PMs released from the first stage ground combustion test of KSLV-II [6].

연료로 연소 시 다량의 입자상 물질을 배출시키지만 Jet A1 입자상 물질의 광학 특성에 중점을 맞춘 연구는 거의 없는 것으로 조사된다. 따라서 본 연구에서는 동축류 버너 에서 Jet A1 연소 후 발생한 입자상 물질에 대해 무차원광 소멸계수 측정과 형태학적 분석을 수행하였다.

본 연구에서 측정된 Jet A1 입자상 물질의 특성 데이터 는 광학식 농도 측정 및 저감 장치와 기후 예측 연구의 기 초 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 Jet A1 연료의 구성 성분은 기체 크로 마토그래프/질량 분석기(Gas Chromatograph/Mass Spectrometer, GC/MS)를 이용하여 분석하였고 그 결과는 Table 1에 정리되어 있다. Table 1에 정리되어 있는 바와 같이, Jet A1은 다양한 탄화수소 혼합물로 구성되어 있지만 주성분은 Decane과 Dodecane 계열임을 확인할 수 있다.

 Table 1. Summary of chemical composition of Jet A1 fuel

No	Compounds	Chemical	Total
	detected	formula	(%)
01	Trichloromethane	CHCI3	0.18
02	Heptane	C7H16	0.44
03	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	1.97
04	1-Hexanol, 2-ethyl-	$C_8H_{18}O$	1.07
05	Octane, 3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	2.00
06	Nonane	C9H20	8.45
07	Octane, 2,6-dimethyl-	C10H22	3.61
08	Nonane, 4-methyl-	C10H22	3.93
09	Decane	C10H22	11.38
10	Decane, 4-methy-	C11H24	3.18
11	Decane, 4-methy-	C11H24	1.64
12	Decane, 3-methy-	C11H24	3.45
13	Undecane	C11H24	11.58
14	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	C10H14	2.10
15	Undecane, 5-methyl-	C12H26	2.81
16	Undecane, 3-methyl-	C12H26	1.87
17	Dodecane	C12H26	10.86
18	Undecane, 2,6dimethyl-	C13H28	2.33
19	Dodecane, 2-methyl-	C13H28	1.64
20	Tridecane, 7-methyl-	C14H30	1.75
21	Tridecane	C13H28	9.15
22	Tridecane. 2-methyl-	C14H30	1.22
23	Dodecane, 2,6,10-trimethyl-	C15H32	1.44
24	Tetradecane	C14H30	7.84
25	Pentadecane	C15H32	3.40
26	Hexadecane	C16H34	0.71

위해 Bronkhorst社의 등유 전용 기화기(Controlled Evaporator and Mixer, CEM)를 사용하였다. 액상의 연료를 기화기에서 가스화한 후 캐리어(Carrier) 가스인 질소를 이용해 동축류 버너의 중심관에 공급하였다. 산화제로는 건공기(Dry air)를 사용했으며 동축류 버너 외관으로 공급 되고 산화제가 투입되는 버너의 내부에 스테인리스 구슬 을 채워 균일한 동축류 유동을 발생시켜 화염의 안정성을 확보하였다. 기화기부터 동축류 버너 중심관까지는 밴드 히터를 부착하여 이송 중 가스화된 Jet A1 연료의 응축을 방지하였다. 동축류 버너에 공급된 연료와 산화제는 버너 끝단에서 강제 스파크 점화원에 의해 연소가 개시되고 생 성된 입자상 물질은 버너 상단의 후드를 통해 Fig. 3에 도 시되어 있는 TC(Transmission Cell)로 유입된다.

TC 하단은 밴드 히터로 가열하여 유입된 입자상 물질이 침착되는 것을 방지하였다[15]. 동축류 버너에 공급되는 연료 및 산화제와 캐리어 가스의 유량은 사전 실험을 통해 안정적인 확산 화염에서 충분한 입자상 물질을 배출할 수 있는 조건으로 설정하였고 각각의 설정 유량은 Table 2에 정리하였다.

**Table 2.** Summary of flow rates for fuel, oxidizer and carrier gases

Fuel	Fuel flow	Air flow	N <sub>2</sub> flow
	[g/h]	[L/min]	[g/h]
Jet A1	5.5	3.5	3.5



Fig. 3. Schematic of experimental set-up used to measure a dimensionless light extinction coefficient of PMs.

액상의 Jet A1 연료를 안정적으로 연소시키기 위해 Lab-scale 규모의 동축류 버너 장치를 구성하였으며 버너 의 형상은 Fig. 2에 도시하였다. 액상의 연료를 기화하기



Fig. 2. Configuration of a coaxial diffusion burner used in the present study.

Fig. 3에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 TC에는 입자상 물 질의 유입 시 발생하는 광소멸 현상을 측정하기 위해 파장 이 650 nm인 레이저와 광검출기 2대가 설치되어 있다. TC 양 끝단의 광학 창을 통해 레이저(광원)를 통과시키고 입 자상 물질에 의한 광소멸이 발생하기 전후의 입사광(*L*)과 투과광(*I*)의 강도를 측정하여 광투과율 (*I*/*L*)을 계산할 수 있다. TC를 통과한 입자상 물질은 석영 섬유 필터에 포집 되고 측정된 필터의 무게는 무차원 광소멸계수 계산에 사 용된다.

앞서 기술한 광투과율은 레이저와 광검출기로 구성된 광학계의 출력 안정성과 응답성에 영향을 받을 수 있다. 따라서 광투과율의 신뢰성을 확보하기 위해 광학계의 성 능 검증을 수행하였다. 성능 검증은 흡수식 중립 필터 (Neutral Density, ND)의 광학밀도(Optical Density, OD) 와측정된 광투과율의 식(1)을 이용하여 비교하였다[16].

$$Optical \ Density = -\log\left(\frac{T}{100}\right), \ T = \frac{I}{I_0}$$
(1)

광학밀도 값이 고정된 필터에 레이저를 투과시키고 광 검출기로 측정한 강도를 이용하여 광투과율을 계산한 뒤 식 (1)에 대입하여 광학밀도로 환산하였다. 광학밀도 값 (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1.0)을 갖는 ND 필터의 광투과 율을 측정하고 이론적으로 알려진 광학밀도 versus 광투 과율의 calibration curve와 비교하였다.

Fig. 4는 이론적으로 알려진 광학밀도-광투과율 calibration curve에 ND 필터를 통해 측정한 광투과율 값을 대 조한 결과를 나타낸 것이다. 이상적인 calibration curve에



Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental optical density.

측정된 광투과율 값이 높은 일치율을 보이는 것을 확인할 수 있고 이를 통해 본 실험에 사용된 레이저와 광검출기의 출력값을 신뢰할 수 있다고 판단하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

앞서 기술한 바와 같이 입자상 물질에 의한 광소멸 현상 은 Beer-Lambert Law에 기초하여 식 (2)의 상관관계로 표 현할 수 있다[17].

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-K_e \frac{f_v}{\lambda}L\right) \tag{2}$$

식 (2)에서 I는 레이저 투과광의 강도, I<sub>0</sub>는 레이저 입사 광의 강도, f<sub>v</sub>는 광학식의 입자상 물질 농도,  $\lambda$ 는 레이저 파장, L은 레이저의 경로 길이를 의미한다. 식 (2)에서 광 투과율은 TC로 입자상 물질이 유입되는 도중 특정 시간 대의 평균값을 사용하였고 동일한 시간대에 TC 하류에서 포집된 중량식의 입자상 물질 농도 f<sub>vg</sub>는 식 (3)과 같이 표 현할 수 있다.

$$f_v = f_{vg} = \frac{m}{V t \rho} \tag{3}$$

식(3)에서 m과 p는 입자상 물질의 질량과 밀도, V는공 기의 유량, t는 포집 시간을 의미한다. 입자상 물질의 밀도 는 선행연구에서 인용되는 1.74 g/cm<sup>3</sup>를 적용하였다[18]. 최종적으로 식(3)의 입자상 물질의 농도를 식(2)에 대입 하여 정리하면 무차원 광소멸계수는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_e = -\frac{Vt\rho \ln\left(I/I_0\right)}{Lm} \tag{4}$$

Fig. 5는 필터에 포집된 입자상 물질의 농도와 포집 기간 동안 측정된 광투과율의 상관관계를 도시한 결과이다. 입 자상 물질의 포집 시간을 증감하여 0.01 ~ 0.2 ppm의 입 자상 물질의 포집하였고, 그림에 도시된 바와 같이 입자상 물질의 농도가 증가함에 따라 광투과율이(-ln(I/I<sub>0</sub>)) 선 형적으로 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 필 터에 포집된 입자상 물질의 농도와 광학식으로 측정된 농 도가 서로 선형적 상관관계가 있음을 의미하고 식 (4)를 이용한 무차원 광소멸계수 측정의 타당성을 뒷받침하는 결과이다.



Fig. 5. Measured PM concentration as a function of laser transmittance.

Table 3. Comparisons of	$K_e$ measured from burning
different fuels	

E 1	V	W7 1 41	D.C	
Fuel	K <sub>e</sub>	wavelength	Kef	
Jet A1	11.16	650 nm	Present study	
Ethene	8~9	632.8 nm	[10]	
Ethene	9.65	632.8 nm		
JP-8	9.87	632.8 nm	[14]	
Acetylene	8.12	632.8 nm		
Ethene	9.35	856 nm	[0]	
Acetylene	8.83	856 nm		

Table 3에는 본 연구에서 측정한 Jet A1 입자상 물질의 무차원 광소멸계수와 선행연구에 보고되고 있는 다른 입 자상 물질의 무차원 광소멸계수가 정리되어 있다.

Table 3에 정리되어 있는 바와 같이 Jet A1 입자상 물질 의 무차원 광소멸계수는 11.16으로 다른 연료 대비 높은 값을 갖고 있으며, 이는 Jet A1 입자상 물질이 유발하는 광 산란이나 광흡수 효과가 다른 연료로부터 발생된 입자상 물질에 비해 강하다는 것을 의미한다.

무차원 광소멸계수(K<sub>e</sub>)는 식(5)에 제시된 바와 같이 광 산란계수(K<sub>s</sub>)와 광흡수계수(K<sub>a</sub>)의 합으로 나타낼 수 있 다. 이때 광산란계수의 경우 입자상 물질의 물리적 형상과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다[19].

$$K_e = K_s + K_a \tag{5}$$

본 연구에서는 Jet A1에서 발생한 입자상 물질의 형태



Fig. 6. Typical TEM image of Jet A1 PM agglomerate.

학적 파라미터 측정을 위해 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)을 이용하여 입자상 물 질을 가시화하였다. Fig. 6은 Jet A1 입자상 물질의 TEM 이미지로, 이미지에서 확인할 수 있는 바와 같이 입자상 물질은 구형의 뚜렷한 단일 입자 여러 개가 응집체를 구성 하는 전형적인 프랙탈 형상을 띄고 있다.

이와 같이 프랙탈 형상 구조를 갖는 입자의 광산란계수 는 Rayleigh-Debye-Gans 이론식을 토대로 형상학적 파라 미터를 조합하면 식 (6)과 같이 정리될 수 있다[20].

$$K_{s} = 4\pi x_{p}^{3} k_{f} F(m) \left(\frac{3D_{f}}{16x_{p}^{2}}\right)^{D_{f}/2}$$
(6)

식 (6)에서  $x_p$ 는 광학 직경,  $k_f$ 는 프랙탈 선인자, F(m)은 굴절함수,  $D_f$ 는 프랙탈 차원을 의미한다. 광학 직경  $(x_p)$ 은 입자상 물질의 단일 입자 직경 $(d_p)$ 과 관련이 있으며  $\pi d_p/\lambda$ 로 나타낼 수 있다. 프랙탈 파라미터인 차원 $(D_f)$ 과 선인자 $(k_f)$ 는 입자상 물질의 응집체 형상을 특성화하는 매개변수로 응집체의 밀집도를 의미한다. 프랙탈 파라미 터가 커질수록 응집체 형상이 분기형의 가지 구조에서 덩 어리지는 응집체 특성을 보이며 광산란 영향을 주는 것으 로 잘 알려져 있다[19].

본 연구에서는 TEM 이미지의 응집체 형상을 통해 식 (6)에 제시된 프랙탈 및 형상학적 파라미터를 정량적으로 측정하기 위해서 응집체에 대해 디지털 이미지 프로세싱 기법을 적용하였으며[21], 주요 파라미터를 Fig. 7에 도시 하였다.



Fig. 7. Morphological parameters used in the digital image processing.

Fig. 7에서 d<sub>p</sub>는 단일 입자의 평균 직경, R<sub>g</sub>는 회전반경, A<sub>a</sub>는 응집체의 투영 면적, L은 응집체의 최대길이를 의미 한다. 측정한 단일 입자의 직경과 응집체의 투영 면적으로 식 (7)의 상관관계를 이용하면 응집체를 구성하는 단일 입 자의 수(N<sub>p</sub>)를 구할 수 있다[22].

$$N_p = 1.15 \left[ \frac{A_a}{(\pi d_p^2/4)} \right]^{1.09}$$
(7)

이때 단일 입자의 수는 프랙탈 차원과 프랙탈 선인자, 회 전반경과 단일 입자의 직경, 응집체의 최대길이의 상관관 계를 통해 다시 식 (8)과 같이 표현할 수 있다[22].

$$N_p = k_f \left(\frac{2R_g}{d_p}\right)^{D_f} = k_L \left(\frac{L}{d_p}\right)^{D_f}$$
(8)

응집체의 프랙탈 차원은 식 (8)을 식 (9)로 다시 정리하 여  $Log(L/d_p) - Log(N_p)$ 의 선형 그래프를 도시한 뒤 직 접 도출할 수 있다. 식 (9)에서 기울기는  $D_f$ , y 절편은  $k_L$ 을 의미한다.

$$\log(N_p) = D_f \log\left(\frac{L}{d_p}\right) + \log(k_L)$$
(9)

Fig. 8은 응집체의 형상 파라미터의 계산 결과를 바탕으로  $Log(L/d_p) - Log(N_p)$  상관관계를 도시한 그래프이 다. 0.95의 높은  $\mathbb{R}^2$  값을 통해 단일 입자의 직경과 응집체의 최대길이 및 입자 수의 선형 관계성을 확인할 수 있다. 작은 단일 입자 직경을 갖는 큰 응집체일수록 구성된 입자의 익 수는 많은 것으로 판단할 수 있다.



Fig. 8. Logarithmic plots for the determination of PM fractal factors.

 
 Table 4. Summary of measured morphological and fractal parameters for Jet A1 PM agglomerate

<i>d</i> <sub>p</sub> (nm)	x <sub>p</sub> (nm)	R <sub>g</sub> (nm)	$N_p$	$D_f$	$k_{f}$
37.11	0.18	131	75	1.68	2.85

Jet A1 입자상 물질의 TEM 이미지에서 측정한 형태학적 파라미터와 Fig. 8에서 도출한 프랙탈 파라미터는 Table 4 에 정리되어 있다.

TEM 이미지에서 측정된 프랙탈 및 형태학적 파라미터 들을 이용하면 입자에 의한 전체 광소멸량에서 광산란의 비율을 의미하는 산란 알베도(Scattering albedo),  $\omega_a$ 를 추 정할 수 있다[26-28].

$$\overline{\omega_a} = \frac{\overline{\rho_{sa}^A}}{1 + \overline{\rho_{sa}^A}} \tag{11}$$

식 (11)에서  $\overline{\rho_{sa}^{4}}$ 는 모집단의 평균 산란-흡수 비율을 의 미하며 식 (12)와 같이 정의할 수 있다.

$$\overline{\rho_{sa}^{A}} = \frac{\overline{N_{p}^{2}}}{\overline{N_{p}}} \omega_{p} \left( 1 + \frac{4}{3D_{f}} k^{2} \overline{R_{g}^{2}} \right)^{-D_{f}/2}$$
(12)

식 (12)에서 N<sub>p</sub>는 단일 입자의 수, D<sub>f</sub>는 프랙탈 차원, k 는 2π/λ, R<sub>g</sub>는 회전반경, ω<sub>f</sub>는 단일 입자의 albedo로 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\omega_P = \rho_{sa}^p = \frac{2}{3} k^3 r_p^3 \frac{F(m)}{E(m)}$$
(13)

식 (13)에서 r<sub>p</sub>는 단일 입자의 반경, F(m)과 E(m)은 굴절함수를 의미하며 각각 식 (14)와 식 (15)와 같이 정의 된다[26-27, 29].

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{(n^2 - k^2 - 1)^2 + 4n^2k^2}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2}$$
(13)

$$E(m) = -Im\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) = \frac{6nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2k^2}$$
(14)

이때 굴절지수 m은 연소과정을 통해 배출되는 입자상 물질에 일반적으로 적용되는 값(m = 1.75 - 1.03i)을 적 용하였다[26]. 도출된 Jet A1 입장상 물질의 프랙탈 및 형 태학적 파라미터 이용하며 계산된 산란 알베도는 SA( $\overline{\omega_a}$ ) 는 약 0.1로 입자 산란에 의해 소멸되는 광량의 비중이 약 10% 정도라고 판단할 수 있으며, 흡수의 영향이 지배적임 을 의미한다.

이러한 결과는 NIOSH 5040 분석법[30]을 적용하여 포 집된 Jet A1 입자상물질을 대상으로 수행한 Total Carbon (TC) 분석의 결과(Fig. 5) 와도 비교적 잘 일치한다. 입자상 물질의 전체 탄소(TC)의 구성에서 원소 탄소 EC(Elemental Carbon, EC)와 유기탄소 OC Organic Carbon, OC) 의비율은각각 0.8, 0.2로 EC 비율이 4배나높은 것을 확인 할수있다. 원소 탄소(Elemental Carbon, EC)는 그래핀과 유사한 흑연구조를 띄고 빛을 흡수하는 성질이 강한 반면 유기 탄소(Organic Carbon, OC)는 EC와 상반되는 성질의 무정형한 탄소 배열 구조에서 발견되며 빛을 흡수하는 특 성이 약한 것으로 보고되고 있다[23-24]. 이러한 결과는 확산 화염 내부에서 충분한 체류 시간을 거치면서 흑연화 된 탄화 구조를 갖는 성숙한 형태의 입자상 물질 형태로 배 출되기 때문으로 판단된다. 결국, 탄소 함량 결과를 바탕 으로 Jet A1 입자상 물질은 광흡수 성질이 강한 흑연의 탄 소 구조와 유사하며 성숙한 상태의 입자상 물질로 판단할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 한국형 발사체에서 사용 중인 등유 계열 의 항공유 Jet A1을 동축류 버너에서 연소 시킨 후 발생한 입자상물질에 대해 형태학적 및 화학적 탄소 구조에 기반 한 광학 특성의 결론을 도출하였다.

- Jet A1 입자상 물질의 무차원 광소멸계수는 11.16으로 C/H 비가 낮은 탄화수소계 연료 대비 높은 값을 가졌 으며, 프랙탈 및 형태학적 특성에 의한 광산란 보다는 탄소 구조에 의한 광흡수 영향이 광소멸의 주된 요인 으로 판단된다.
- 광산란의 영향을 파악하기 위해 측정한 형태학적 파라 미터(응집체 최대길이, 단일 입자 평균 직경, 입자 수)
   의 선형적 관계를 통해 응집체 형상을 특성화했으며, Jet A1 입자상 물질의 프랙탈 차원(D<sub>f</sub>)과 선인자(k<sub>f</sub>)값 1.68, 2.85를 각각 도출하였다.
- 확산 화염에서 발생된 Jet A1 입자상 물질의 탄소 구조 비율은 원소 탄소(EC)와 유기 탄소(OC)가 각각 0.80, 0.20으로 광흡수 특성이 강한 흑연 구조와 유사할 것으 로 판단된다.
- 4) Jet A1 입자상 물질의 Scattering Albedo는 0.094로 추 정할 수 있으며 전체 소멸량 대비 산란의 비율은 약 10% 정도로 광흡수의 영향이 지배적임을 확인하였다.
- 5) 국내 발사체의 연료로 사용 중인 Jet A1 입자상 물질의 무차원 광소멸계수와 물리적 및 광학적 특성의 연구 결과는 향후 응용연구의 기초 및 활용 데이터로 사용 될 것으로 기대할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 조선대학교 연구지원금의 지원을 받아 연구 되었음(2022),

### References

- [1] S. Tiwari, G. Pandithurai, S. D. Attri, A. K. Srivastava, V. K. Soni, D. S. Bisht, M. K. Srivastava, Aerosol optical properties and their relationship with meteorological parameters during wintertime in Delhi, India, Atmospheric Research 153 (2015) 465-479.
- [2] A. S. Pipal, P. G. Satsangi, Study of carbonaceous species, morphology and sources of fine (PM2. 5) and coarse (PM10) particles along with their climatic nature in India, Atmospheric Research 154 (2015) 103-115.
- [3] G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. 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, Environment international 74 (2015) 32-41.
- [5] W. S. Nam, M. H. Ryu, J. W. Lee, S. H. Park, Effects of Atmospheric Composition Substitution and Pressure on Soot Formation of Jet-A1 Droplet Flames, Fire Science and Engineering 33.5 (2019) 13-18.
- [6] M. H. Ryu, S. H, Park, An Experimental Study of Effects of Changes in Oxidant Stream Composition on Combustion Characteristics in JET-A1/Oxygen Coaxial Diffusion Flames, Ph.D. Thesis, Chosun University, Korea, 2021.
- [7] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, ... & H. Miller, IPCC fourth assessment report (AR4). Climate change, 374, 2007.
- [8] G. W. Mulholland, M. Y. Choi, Measurement of the mass specific extinction coefficient for acetylene and ethene smoke using the large agglomerate optics facility, Symposium (international) on combustion. Vol. 27. No. 1. Elsevier, 1998.
- [9] J. Zhu, M. Y. Choi, G. W. Mulholland, L. A. Gritzo, Measurement of soot optical properties in the nearinfrared spectrum, Heat Mass Transfer. 43.18 (2000) 3299-3303
- [10] J. F. Widmann, J. C. Yang, T. J. Smith, S. L. Manzello, G. W. Mulholland, Measurement of the optical extinction coefficients of post-flame soot in the infrared, Combust. Flame. 134.1-2 (2003) 119-129.
- [11] M. H. Kim, B. Kang, S. H. Park, A Study on Optical Properties of Particulate Matter Collected from Burning Coal, Journal of Power System Engineering, 26(6), (2022), 101-110
- [12] H. C. Chang, d T. T. Charalampopoulos, Determination of the wavelength dependence of refractive indices of flame soot, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences 430.1880 (1990) 577-591.
- [13] Z. G. Habib, P. Vervisch, On the refractive index of soot at flame temperature, Combust. Sci. Technol. 59.4-6 (1988) 261-274.
- [14] I. M. Kennedy, Models of soot formation and oxidation, Progress in Energy and Combustion Science 23.2 (1997) 95-132.
- [15] F. J. Romay, S. S. Takagaki, D. Y. Pui, B. Y. Liu, Thermophoretic deposition of aerosol particles in turbulent pipe flow, J. Aerosol Sci. 29.8 (1998) 943-959.

- [16] P. Atkins, J. De Paulalio, J. Keeler, Atkins' physical chemistry. Oxford university press, (2023)
- [17] S. C. Choi, Measurement and analysis of the dimensionless extinction constant for diesel and biodiesel soot: influence of pressure, wavelength and fueltype. ProQuest, 2009.
- [18] M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins, T. Kashiwagi, Comparisons of the soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques, Combust. Flame. 102.1-2 (1995) 161-169.
- [19] 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, Adv. Environ. Sci. Technol. 48.6 (2014) 3169-3176.
- [20] U. O. Ko"ylu", G. M. Faeth, Optical properties of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times, (1994) 152-159.
- [21] C. A. Schneider, W. S. Rasband, K. W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, Nature methods 9.7 (2012) 671-675.
- [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] F. Yang, K. He, B. Ye, X. Chen, L. Cha, S. H. Cadle, P. A. Mulawa, One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai, Atmospheric Chemistry and Physics 5.6 (2005) 1449-1457.
- [24] Change, IPCC Climate, The physical science basis, (No Title) (2013).
- [25] A. Gelencsér, Carbonaceous Aerosol, vol. 30 of Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer Netherlands, Dordrecht, doi 10 (2004) 978-1.
- [26] T. C. Williams, C. R. Shaddix, K. A. Jensen, J. M. Suo-Anttila, Measurement of the dimensionless extinction coefficient of soot within laminar diffusion flames, Heat Mass Transfer. 50.7-8 (2007) 1616-1630.
- [27] R. A. Dobbins, C. M. Megaridis, Absorption and scattering of light by polydisperse aggregates, Appl. Opt. 30.33 (1991) 4747-4754.
- [28] C. M. Sorensen, Light scattering by fractal aggregates: a review, Aerosol Sci. Technol. 35.2 (2001) 648-687.

- [29] R. A. Dobbins, G. W. Mulholland, N. P. Bryner, Comparison of a fractal smoke optics model with light extinction measurements, Atmos. Environ. 28.5 (1994) 889-897.
- [30] R. Andrews, P. F. O'Connor, NIOSH manual of analytical methods (NMAM), (2020).



## 저자정보



류명호

강별은 조선대학교 기계시스템· 미래자동차공학과 박사 과정이 며, 관심 분야는 입자상 물질의 물리적&화학적 분석을 통한 광 학 특성 연구이다.



## 류명호는 한국폴리텍대학 광주 캠퍼스 스마트전기자동차과 교 수로 재직 중이며, 관심 분야는 J et Al 점화특성, 이동체(전기차, 수소차), 진단 기술 연구이다.

#### 박설현

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

