

F-76 선박용 디젤유 및 JP-8 항공유 입자상물질의 광학 및 물리적 특성에 대한 실험적 연구

최재혁* · 최석천** · 김대용*** · 이주희**** · 박설현*****

* 한국해양대학교 기관시스템공학부, ** 한국생산기술연구원 고온에너지시스템연구그룹,
*** 조선해양기자재연구원, **** 한국항공우주연구원 우주과학연구팀, ***** 조선대학교 기계시스템공학과

An Experimental Study on Optical and Physical Properties of Particulate Matter produced from F-76 Marine Diesel and JP-8 Aviation Fuels

Jae-Hyuk Choi* · Seuk-Cheun Choi** · Dae-Yong Kim*** · Joo-Hee Lee**** · Seul-Hyun Park*****

* Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam 2-dong, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea

** Thermochemical Energy System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan 331-822, Korea

*** Atmospheric Environment Team, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 606-806, Korea

**** Space Science Research Team, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 305-806, Korea

***** Department of Mechanical Systems Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

요 약 : F-76 선박용 디젤유와 JP-8 항공유의 연소과정에서 발생하는 입자상물질(PM)의 무차원 광소멸계수를 Transmission Cell를 이용하여 측정하였다. 무차원 광소멸계수의 측정방식은 각각 광원의 파장길이 633 nm와 853 nm인 대역에서 중력식 필터법에 의해 채집된 PM의 농도와 광학적 방법에 의해 측정된 PM의 농도를 비교하는 방법을 통해 이루어졌다. 광원의 파장길이, 633 nm 대역에서 측정된 무차원 광소멸계수는 F-76의 연료에서 발생된 PM의 경우 8.8인 반면 JP-8 연료로부터 생성된 PM의 경우 9.8이었다. 한편 광원 파장길이 853 nm로 증가함에 따라 두 연료 모두에서 발생된 PM의 무차원 광소멸계수는 각각 8.2 (F-76)와 8.8 (JP-8)로 감소하는 경향을 나타내었다.

핵심용어 : F-76 선박용 디젤유, JP-8 항공유, 입자상물질, 광학특성, 무차원광소멸계수, 입자형상특성

Abstract : The dimensionless extinction constants of particulate matter for F-76 diesel and JP-8 aviation fuels were measured at both 633 nm and 853 nm in the transmission cell where the simultaneous gravimetric measurement of PM concentration is compared to the light extinction measurement. For the F-76 diesel PM, the average value of the dimensionless extinction constants at 633 nm was 8.8 whereas that of the dimensionless extinction constants for JP-8 was 9.8 at the same wavelength. As the wavelength is increased to 853 nm, the average value for the F-76 diesel was reduced to 8.2 whereas that for JP-8 was decreased to 8.9.

Key Words : F-76 Marine Diesel Fuel, JP-8 Aviation Fuel, Particulate Matter, Optical Properties, Dimensionless Light Extinction Constant, Particle Morphology

1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염규제가 크게 강화되고 있는 가운데, 선박으로부터 대기오염물질의 배출을 규제하는 협약이 제정 및 채택되었다. 국제해사기구(IMO)의 해양오염 방지 협약(MARPOL73/78)을 통해 지구 오존층을 파괴하는 CFC 계

냉매와 Halon가스의 사용을 금지하고, 배기가스 중에 포함된 황산화물(SOx)와 질소산화물(NOx)의 배출을 줄이기 위하여 황함유량이 낮은 선박연료유를 사용하도록 규제하고 질소산화물의 배출허용치를 만족하는 기관의 사용을 의무화하고 있다 (Johansson et al., 2013). 아울러 IMO 해양환경보호위원회(MEPC; Marine Environment Protection Committee)에 선박에서 배출되는 입자상물질(Particulate Matter, PM) 규제의 필요성에 대한 문건이 많이 제출되고 있는 실정이다. 특히 입자상물질을

* First Author : choi_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

† Corresponding Author : isaac@chosun.ac.kr, 062-230-7174

기후변화물질로 IMO규제에 도입하기 위한 논의가 급격히 진행되고 있다. 유사하게 항공기로부터 배출되는 입자상물질 역시 기후변화와의 상관성을 밝히기 위한 연구들이 최근 들어 활발하게 진행되고 있다(Smith and Grainger, 2014; Yang et al., 2009; Kirchstetter and Novakov, 2004). 디젤엔진을 사용하는 선박에서는 다량의 입자상물질이 배출될 수 있으며 등유계열의 항공유를 사용하는 항공기의 터빈엔진 역시 입자상물질을 발생시킬 수 있다. 입자상물질의 생성은 연소기 내부의 온도, 혼합기 운동형태, 연료성분, 확산속도, 반응시간, 연료미립도 등의 요인에 따라 크게 변화하는 것으로 알려져 있다(Stanier, 2003). 최근에는 입자상물질이 대기의 온난화 및 설빙(Snow and Ice)의 용해를 촉진하여 기후변화에 기여할 수 있다는 가능성이 다수 제기되고 있다. 또한 대기로 배출된 입자상물질은 입사광의 산란을 통해 지구의 냉각화에도 기여할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Kirschbaum, 1995). 하지만 대기 중 지속시간이 짧은 단주기 기후변화물질(Short-Lived Climate Forcer, SLCF)로 구분되기 때문에 정량적 기후 변화에 대한 기여도는 많은 논란의 대상이 되고 있다. 결국 입자상물질의 분포가 기후변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 우선 연소과정을 통해서 배출되는 입자상물질의 정확한 측정이 중요하다. 일반적으로 입자상물질의 체적분율(volume fraction)을 측정하는 방법은 입자에 광소멸 측정하는 방법이 일반적이며, 이 경우 입자의 광소멸 계수를 정확히 알고 있어야 한다. 하지만 광소멸 계수는 연료에 따라 서로 다른 값을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 입자의 형상에 따라 광소멸 효과가 (광흡수+광산란)달라질 수 있는 것으로 보고되고 있다. 결국 입자상물질에 의한 기후변화에 대한 기여도를 정확히 이해하기 위해 연료별 입자상물질의 광소멸 계수와 입자의 형상 정보가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 입자상물질을 정확히 측정하기 위해 F-76 선박용 디젤과 JP-8 항공유의 연소과정을 통해 발생된 입자상물질의 무차원 광소멸과 물리적인 형상정보 제공을 위해 기초연구를 수행하였다. 아울러 본 연구에 사용된 F-76 선박용 디젤과 JP-8 항공유의 주요 열화학적 물성치는 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Summary of thermo-chemical properties for F-76 and JP-8 Fuels

	F-76	JP-8
Approximate Formular	$C_{14.8}H_{26.9}O_6$	$C_{11}H_{21}$
H/C ratio	1.82	1.91
Flash Point [°C]	52~82	149
Specific Gravity @ 15.6 °C	0.85	0.81

2. 입자상물질의 광소멸계수 측정 및 실험장치

Fig. 1에 도시되어 있는 것처럼 입자에 의한 광소멸은 입사광의 크기가 입자의 다양한 형상과 화학적 특성에 의하여 산란되고 흡수되어 줄어드는 현상으로 입자의 굴절지수(Refractive index)에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 광소멸계수(K_e)는 광산란계수(K_s)와 광흡수계수(K_a)의 합으로 표현할 수 있다.

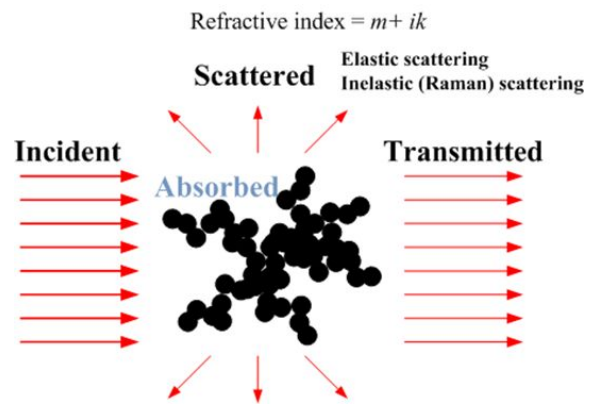


Fig. 1. Schematics of light extinction by particles.

Fig. 2는 각각의 연료로부터 생성된 입자상물질(PM)의 광소멸계수를 측정하기 위해 사용된 실험장치의 개략도이다. 입자상물질인 soot입자는 Wick버너의 연소과정에서 생성되며, Wick버너 화염 끝단으로부터 방출되는 입자상물질은 공기와 혼합되어 Transmission Cell(TC) 안쪽으로 유입된다. TC를 통과하는 동안 입자상물질은 파장이 633 nm와 853 nm의 광원에 노출되어, 입사되는 광을 흡수하거나 산란하게 된다. TC 하류 쪽에는 입자상물질의 채집장치가 설치되어 있으며, 기공(Pore)크기가 0.7 μm인 광섬유 필터가 장착되어

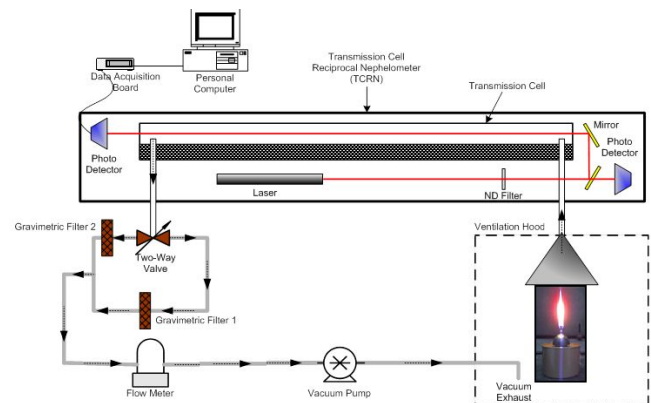


Fig. 2. Schematics of Experimental Setup.

F-76 선박용 디젤유 및 JP-8 항공유 입자상물질의 광학 및 물리적 특성에 대한 실험적 연구

공기와 혼합된 입자상물질만을 추출하도록 설계되어 있다. TC 안쪽으로 유입되는 입자상물질은 공기와 혼합되어 유입되도록 설계되어 있으므로 TC 하류에는 진공펌프가 설치되어 있고, 입자상물질이 필터에 걸러진 후 유입유량은 유량계로 측정하였다.

입자상물질의 광소멸 계수를 측정하기 위해 본 연구에서 사용된 방법은 광학적 방법(광소멸)에 의해 측정된 volume fraction과 필터로 채집된 입자의 질량 상관관계로부터 역산하는 방식이다.

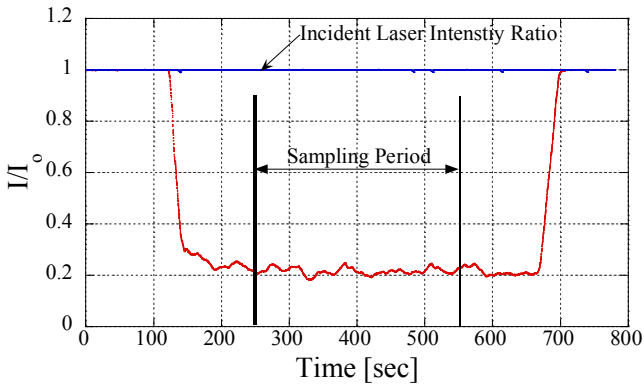


Fig. 3. Measured transmitted laser intensity ratio as a function of time.

TC를 투과한 레이저광의 강도는 앞서 기술한 것처럼 광흡수와 광산란으로 광소멸을 일으키며, 광소멸을 측정하기 위해 광원 과장대역의 강도를 검출할 수 있는 광검출기가 각각 설치되어 있다. 아울러 광소멸의 정도를 정확히 측정하기 위해 광학필터, 데이터 수집장치 등이 부가적으로 설치되었다. 광검출기 및 레이저의 응답성은 광투과율(I/I_0) 측정에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 매 실험 전 확인하였다.

Fig. 3는 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 광원의 입사강도(I_0)를 광검출기로 측정한 뒤 입자상물질이 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광원의 강도(I)를 측정하여 계산한 광투과율(I/I_0)을 도시한 것이다. 그림에 제시되어 있는 바와 같이 입자상물질과 혼합된 공기가 TC에 유입되기 전과 공급이 중단된 뒤의 광투과율(I/I_0)은 항상 일정하였다. 즉, 입자상물질이 TC에 유입되기 전과 후의 광투과율이 일정하였으므로 TC에 잔류하는 입자상물질은 없다고 가정할 수 있다. 또한 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 입자상물질의 채집구간에서 (레이저와 평행선상에 있는 광검출기를 이용하여) 측정한 광원의 크기변화가 없었으므로 광원의 안정성(stability)을 확보였다고 할 수 있다. 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입이 시작된 직후부터 광투과율은 급격히 감소하여 곧 준

정상상태(quasi-steady state)에 도달하였다. 광투과율이 준정상상태에 도달한 직후부터 TC 하류에 설치된 채집장치의 필터를 통해 입자상물질을 채집하기 시작하였다. 이때 준정상상태에 도달한 평균 광투과율(I/I_0)은 Bouguer 법칙에 의해 식(1)로 나타낼 수 있다.

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

식(1)에서 각각 K_e 는 무차원 광소멸계수, f_v 는 광학적으로 측정된 입자상물질의 volume fraction, λ 는 광원의 파장 길이, L 은 레이저의 경로길이를 의미한다. 한편, 필터로 측정된 입자상물질의 volume fraction, f_{vg} 는 식(2)을 이용하여 계산할 수 있다.

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

식(2)에서 m 은 필터에 채집된 입자상물질의 질량, V 는 TC에 유입된 공기의 유량, t 는 채집시간, ρ 는 입자상물질의 밀도이다. 대략 6분 정도의 채집시간동안 필터에 채집된 입자상물질의 질량을 정밀저울을 이용하여 측정하였으며, 입자상물질의 밀도는 연료와 상관없이 널리 사용되는 soot 입자의 밀도값(1.7 g/cm^3)을 적용하였다(Choi et al., 1995). 식(2)에 의해 계산된 volume fraction, f_{vg} 는 필터로 채집한 입자상물질과 동일한 시간대에 측정하였으므로 식(1)의 광투과율(I/I_0) 평균값을 이용하여 계산한 volume fraction, f_v 와 같아야 하고 이 관계를 적용하면 식(3)로 표현할 수 있다.

$$f_v = f_{vg} = -\frac{\lambda \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{LK_e} \quad (3)$$

결국, 무차원 광소멸계수, K_e 는 식(4)을 통해 최종 계산할 수 있다.

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

식(4)에서 TC 안쪽으로 유입된 유량은 필터를 통과한 공기의 유량을 측정하게 되는데, 채집구간 동안 입자상물질이 필터에 퇴적되어감에 따라 필터 선단과 후단의 압력차로 인해 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 유량의 변화가 불가피하게 된다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 입자상물질을 채집하지 않은 경우 필터를 통과하는 유량이 일정하게 유지되는 반면 필터에 채집이 시작된 직후 유량이 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

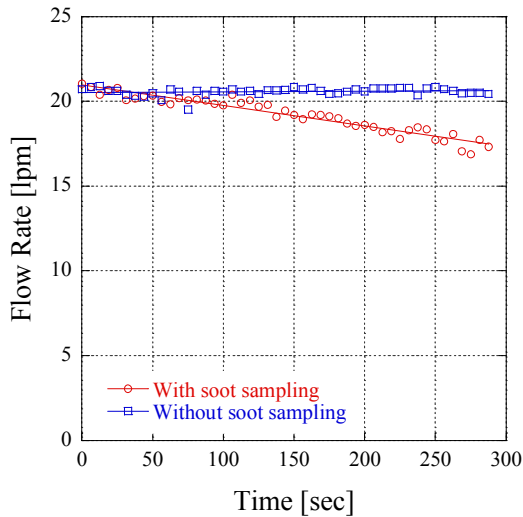


Fig. 4. Variations in the flow rate during a sampling period.

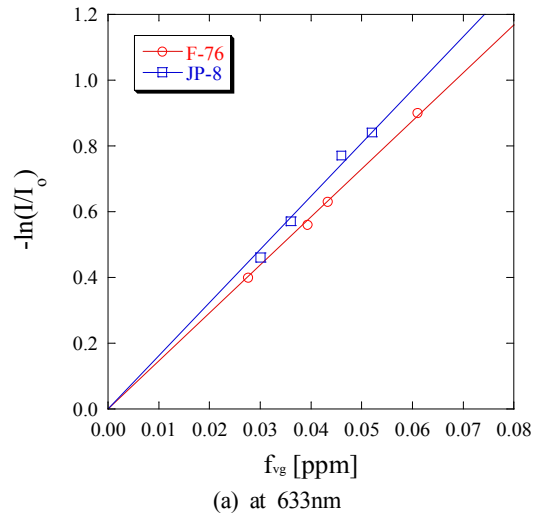
이러한 유량을 변화를 고려하기 위해 Fig. 3에 제시된 유량 과 시간 그래프의 기울기 차로부터 얻어진 상관관계에 의해 결정된 보상계수를 식(4)에 곱하여, 최종적으로 광소멸 계수, K_e 값을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

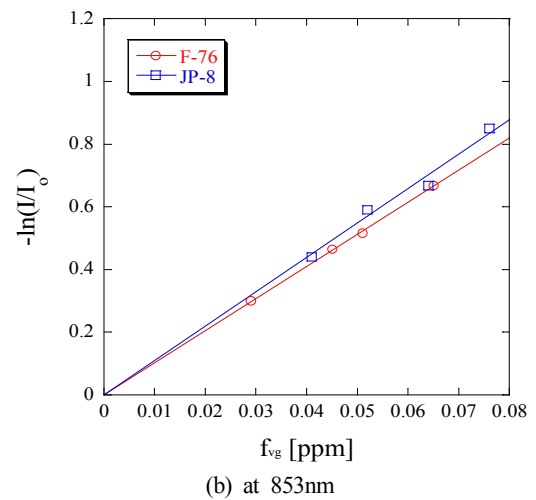
Fig. 5는 채집된 F-76 선박용 디젤유와 JP-8 항공유의 입자상물질의 volume fraction과 $-\ln(I/I_0)$ 평균값과의 상관관계를 서로 다른 연소조건에서 4회 실시하여 획득한 결과를 도시한 그래프이다.

그림에서 보이는 바와 같이 TC 안쪽으로 유입된 F-76 선박유 및 JP-8 항공유의 입자상물질의 volume fraction이 증가함에 따라 광원의 파장과 상관없이 광소멸도 함께 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 JP-8에서 발생된 입자상물질은 F-76 디젤에서 생성된 입자상물질과 동일한 양이 TC로 유입되어도 더 큰 광소멸을 유발하고 있다. 이는 각 연료에서 발생된 입자상물질의 광학적 특성이 상이할 수 있음을 의미한다. 특히, 광원의 파장 길이가 853 nm로 증가하면 동일한 입자상물질의 유입량에 대해 두 연료간의 광소멸 차이가 줄어들게 된다.

각 연료로부터 생성된 입자상물질의 광학특성을 좀 더 자세히 알아보기 위하여 Fig. 6에 광원의 파장 길이별로 식(4)에 의해 계산된 무차원 광소멸계수, K_e 평균값을 도시해보았다. JP-8 연료에서 생성된 입자상물질의 K_e 값은 633 nm 파장 대역에서 9.8인데 비해 F-76 연료의 경우 K_e 값은 이보다 작은 8.8 이었으며, 광원의 파장 길이가 증가하면서 두 연료 모두 입자상물질의 K_e 값이 각각 8.9와 8.2로 감소하였다.



(a) at 633nm



(b) at 853nm

Fig. 5. Laser transmittance plotted as a function of PM volume fraction.

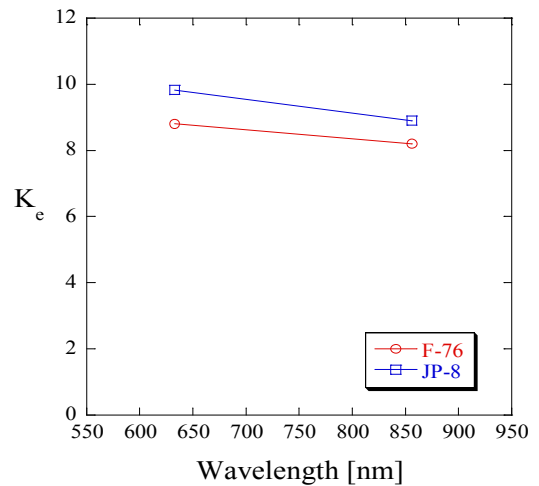


Fig. 6. Calculated dimensionless light extinction constant as a function of wavelength.

하지만 JP-8 연료로부터 생성된 입자상물질의 K_a 값은 F-76 연료에 비해 사용된 광원의 파장 길이에 관계없이 항상 크고, 파장이 길어짐에 따라 감소하는 폭도 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 입자에 의한 광소멸(K_e)은 광흡수(K_a)와 광산란(K_s)의 합을 의미하며, 광원의 파장 길이가 길어질수록 입자에 의한 광흡수 및 광산란 효과는 줄어드는 것으로 알려져 있다(Zhu et al., 2000). 입자에 의한 광흡수와 광산란 효과는 입자의 형상(morphology)과 밀접한 관련이 있으며, 다양한 방법에 의해 설명할 수 있으나, 입자상물질의 경우 식(5)와 (6)에 제시된 Rayleigh-Debye-Gans (RDG)이론에 의해 직관적으로 표현될 수 있다.

$$K_a = 6\pi E(m) \quad (5)$$

$$K_s = 4\pi x_p^3 k_f F(m) \left(\frac{3D_f}{16x_p^2} \right)^{\frac{D_f}{2}} \quad (6)$$

여기서, m 은 입자상물질의 굴절지수 ($m=n-ik$)이고, x_p 는 입자의 광학직경($\pi d_p/\lambda$)이며, k_f 와 D_f 는 각각 fractal prefactor, fractal dimension을 의미한다. 또한 식(5)와 (6)에서 $E(m)$ 과 $F(m)$ 의 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$E(m) = \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (7)$$

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (8)$$

결국, 입자상물질에 의한 광소멸 현상은 굴절지수와 식(5)와 (6)에 포함되어 있는 입자의 형상(x_p, k_f, D_f)에 의해 큰 영향을 받는다.

본 연구에서는 입자상물질의 형상을 알아보기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 가시화하였으며, 디지털 이미지 프로세싱 과정을 통해 입자상물질의 binary 이미지를 추출하였으며, 이미지로부터 Fig 7에 제시된 입자 덩어리의 회전반경, R_g 와 입자 환형의 지름, d_p 및 개수, N_p 를 구하기 위해 식(9)와 식(10)을 적용하였다.

$$N_p = \left(\frac{A_a}{\pi d_p^2 / 4} \right)^{1.09} \quad (9)$$

$$R_g = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} r_i^2} \quad (10)$$

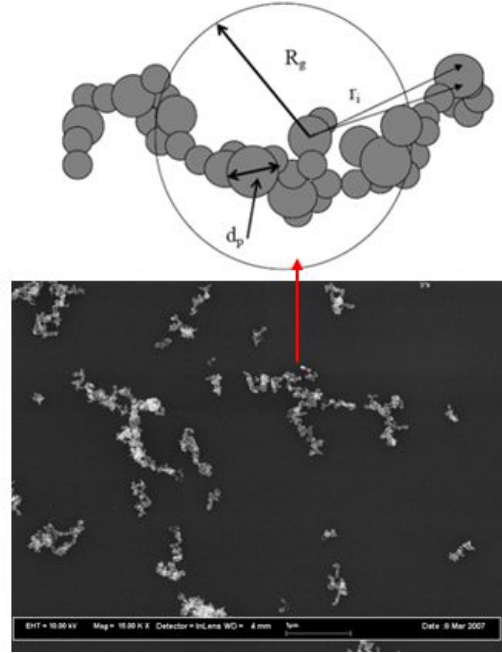


Fig. 7. SEM image of PM collected from laminar diffusion flames.

특히, d_p 는 확대배율이 높은 SEM이미지의 scale bar를 이용하여 mm /pixel 정보를 획득하고 이를 기준으로 측정하였다. 이미지프로세싱 기법을 이용하여 d_p, R_g, N_p 를 결정하는 방법은 참고문헌(Choi, 2009)에 잘 기술되어있다. 한편 fractal prefactor, k_f 와 fractal dimension, D_f 는 식(11)에 제시된 관계식을 Fig. 8의 그래프로 표현함으로써 구할 수 있다. 즉, D_f 는 Fig. 8에 제시된 1차 함수의 기울기와 같으며, k_f 는 수직축과의 교차점(y절편)으로 계산함으로써 구할 수 있다.

$$\log(N_p) = D_f \log \left(\frac{R_g}{d_p} \right) + \log(k_f) \quad (11)$$

입자상물질의 SEM 이미지와 식(9)-(11)을 통해 결정된 입자상물질의 형상정보는 Table 2에 요약되어 있으며 d_p 와 R_g 는 100개 이상의 입자의 샘플을 측정하여 얻은 평균값이다. Table 2에 잘 정리되어 있는 것처럼, JP-8의 입자상물질은 F-76의 입자상물질에 비해 회전반경, R_g 는 작지만 입자 환형 지름, d_p 가 상대적으로 커서 환형입자들이 모여 있는 정도(조밀도, compactness)를 나타내는 fractal prefactor, k_f 는 오히려 JP-8 연료의 입자가 큰 것을 알 수 있다. 아울러 입자 덩어리의 형상 정보를 나타내는 fractal dimension, D_f 는 JP-8 연료의 입자상물질이 다소 크지만, Fig 7의 SEM 이미지에서 볼 수 있는 바와 같이 두 연료의 입자상물질은 형태상 모두 유사한 Cluster-Cluster 구조를 가지고 있다. 하지만 식(6)을 통해서 유

추해 볼 수 있는 것처럼 JP-8 연료의 입자상물질의 x_p , k_f , D_f 가 모두 크기 때문에 일정한 입자의 굴절지수가 동일한 경우 F-76 연료의 입자상물질보다 산란효과가 두드러지게 나타날 것으로 예측해 볼 수 있다. 결국 Fig. 6에서 두 연료의 광소멸 계수, K_e 의 차이는 광산란의 차이로 인한 결과가 일정 부분 반영된 것이라 볼 수 있다. 아울러 광원의 파장길이가 길어짐에 따라 F-76 연료에 비해 JP-8 연료로 발생된 입자상물질의 K_e 값이 급격히 감소하는 이유는 입자의 fractal dimension의 파장 길이와의 연관성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

Table 2. Summary of morphological factors for PMs produced from F-76 and JP-8 Fuels

Fuel	d_p [nm]	R_g [nm]	x_p	N_p	D_f	k_f
F-76	38	270	0.19	98	1.53	7.38
JP-8	51	236	0.19	83	1.57	8.41

4. 결론

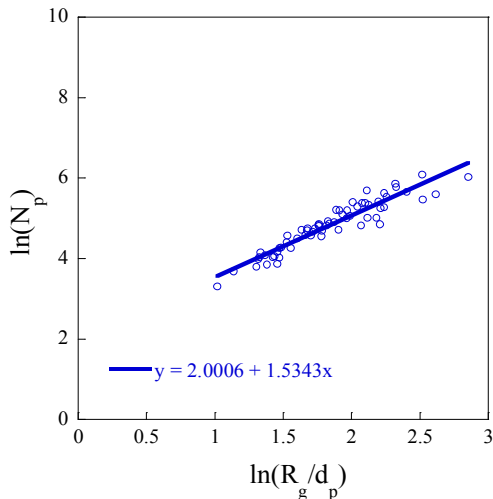
본 연구에서는 F-76 선박용 디젤유와 JP-8 항공유 층류 확산화염으로부터 생성된 입자상물질의 무차원 광소멸계수를 633 nm 파장과 853 nm대역에서 측정하였다. 633 nm 파장대역에서 측정된 평균 무차원 광소멸계수는 F-76 입자상물질의 경우 8.8 JP-8 입자상물질은 9.8인 반면 853 nm 파장대역에서는 각각 8.2(F-76)와 8.8(JP-8)로 감소하였다. 입자상물질 간에 측정된 광소멸 특성차이는 입자형상(k_f , D_f)의 상이성으로 인해 부분적으로 광산란 효과가 달라지기 때문이다. 즉 JP-8 연료에 발생된 입자상물질의 k_f , D_f 가 증가하여 광산의 영향이 커지기 때문이다. 보다 자세히 광소멸 특성 파악을 위해서는 입자상물질의 fractal 특성은 물론 굴절지수의 정확한 정보와 해석을 통한 광흡수 효과도 정량적으로 규명되어야 하지만 본 연구에서 제시된 결과는 F-76 선박용 디젤유와 JP-8 항공유 연료로부터 생성된 입자상물질의 가시광 산란 및 흡수특성에 관한 기초 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

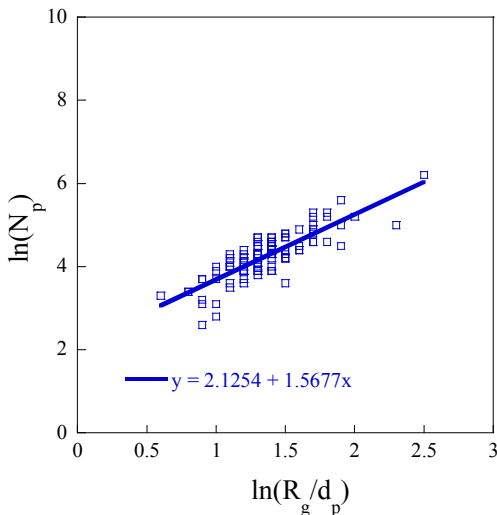
본 연구는 동아대학교 재원으로 건설교통기술연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] Choi, S. C.(2009), Measurement and Analysis of the Dimensionless Extinction Constant for Diesel and Biodiesel Soot: Influence of Pressure, Wavelength and Fuel-Type, Ph.D. thesis, Drexel University, pp. 1-228.
- [2] Choi, M. Y., G. W. Mulholland, A. Hamins, and T. Kashiwagi(1995), Comparisons of soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques, Combustion and Flame, Vol. 102, pp. 161-169.
- [3] Johansson, L., J. P. Jalkanen, J. Kalli and J. Kukkonen



(a) PM produced from JP-8



(b) PM produced from F-76

Fig. 8. Logarithmic plots for the determination of PM morphological factors, D_f and k_f .

- (2013), The evolution of shipping emissions and the costs of regulation changes in the northern EU area, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 13, pp. 11375-11389.
- [4] Kirschbaum, M. U. F.(1995), The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage, *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 27, No. 6, pp. 753-760.
- [5] Kirchstetter, W. T. and T. Novakov(2004), Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Vol. 109, p. D21208.
- [6] Smith, A. J. A. and R. G. Grainger(2014), Simplifying the calculation of light scattering properties for black carbon fractal aggregates, *Atmos.Chem. Phys.* Vol. 14, pp. 7825-7836.
- [7] Stanier, C. O.(2003), Ultrafine Particles in the Atmosphere: Formation, Emissions and Growth, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University.
- [8] Yang, M., S. G. Howell, J. Zhuang and B. J. Huebert (2009), Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China - interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE, *Atmos. Chem. Phys.* Vol. 9, pp. 2035-2050.
- [9] Zhu, J. Y., 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, pp. 3299-3303.

Received : 2014. 10. 27.

Revised : 2014. 11. 26.

Accepted : 2014. 12. 26.