

# 선박 및 육상 디젤 엔진용 연료유에서 발생하는 입자상물질에 대한 무차원 광소멸계수 계측에 관한 연구

노범석\* · 최재혁\*\* · 조권회\*\*\* · 박설현\*\*\*\* · 이원주\*\*\*\*\*

\* 한국해양수산연수원, \*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부, \*\*\* 한국해양대학교 해양플랜트운영학과,  
\*\*\*\* 조선대학교 기계설계공학과, \*\*\*\*\* 한국해양대학교 기관공학부

## A Study on the Measurement of the Dimensionless Light Extinction Constant for Particulate Matter from Fuel Oil for Marine and Land Diesel Engines

Beom-Seok Rho\* · Jae-Hyuk Choi\*\* · Kwon-Hae Cho\*\*\* · Seul-Hyun Park\*\*\*\* · Won-Ju Lee\*\*\*\*\*

\* Education & Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

\*\* Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam 2-dong, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

\*\*\* Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam 2-dong, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

\*\*\*\* Department of Mechanical Systems Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

\*\*\*\*\* Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam 2-dong, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea

**요약** : 선박용 연료유가 연소하는 과정에서 배출되는 오염물질은 대기오염을 유발하고 인체에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그에 따라, IMO에서는 선박에서 배출되는 오염물질을 규제하고 있다. 하지만 입자상물질(Particulate matter: PM)에 대한 규제는 아직 논의단계에 있으므로 선제적인 대응이 필요하다. 그러기 위해서는 입자상물질에 대한 기초적인 연구가 필수적이다. 이번 연구에서는 해상용 연료유에서 발생하는 입자상물질의 기초 데이터 구축을 위해 선박 디젤 엔진에 사용되는 연료유의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 계측하여 분석하였다. 특성 비교를 위해 육상 디젤 엔진에 사용되는 연료유를 같은 방법으로 측정하였다. 두 연료유는 황함유량과 밀도에서 차이가 난다. 무차원 광소멸계수( $K_e$ )는 633 nm의 레이저를 이용하여 광학적인 방법으로 측정하고 중력식 필터법에 의해 채집된 입자상물질의 체적분율을 이용하여 결정하였다. 선박용 연료유에서 배출되는 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )는 8.28이고, 육상용 연료유는 8.44이다. 두 연료유의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )는 측정 불확도 범위내에서 거의 유사하였다. 하지만 Rayleigh limit 해법에서 구한 값과의 비교를 통해 광산란 비중이 클 수 있는 부분과 광투과율과 채집질량과의 관계를 통해 광소멸 특성이 상이할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 선박용 연료유, 입자상물질, 무차원 광소멸계수, 광학특성, 입자형상특성

**Abstract** : It is known that the pollutant emitted from the combustion process of marine fuel oil causes air pollution and harmful effects to the human body. Accordingly, IMO regulates pollutants emitted from ships. However, the regulation of Particulate Matter (PM) is still in the process of debate, so preemptive action is needed. Fundamental research on PM is essential. In this study, the Dimensionless Light Extinction Constant ( $K_e$ ) of fuel oil used in marine diesel engines was measured and analyzed to construct the basic data of the PM generated from marine-based fuel oil. The fuel oil used in the land diesel engine was measured in the same way for character comparison. Both fuel oils differ in sulfur content and density. The  $K_e$  was measured via the optical method using a 633 nm laser and was determined by using the volume fraction of PM collected by the gravimetric filter method. The  $K_e$  of the PM discharged from marine fuel oil is 8.28, and the land fuel oil is 8.44. The  $K_e$  of two fuel oils was similar within the measurement uncertainty range. However, it was found by comparison with the value obtained by the Rayleigh-Limit solution that the light scattering portion could be large. Also, it was found that light extinction characteristics could be different due to the relationship between light transmittance and collected mass.

**Key Words** : Marine fuel oil, Particulate Matter (PM), Optical Properties, Dimensionless Light Extinction Constant, Particle Morphology

\* First Author : bsro@seaman.or.kr, 051-620-5779

† Corresponding Author : choi\_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

## 1. 서론

탄화수소 계열의 연료가 연소하는 과정에서 배출되는 입자상물질(Particulate Matter: PM)은 대기오염을 유발하고 인체에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 현대 사회에서는 경제 성장의 이슈에서 예전보다 얼마나 더 환경적이고 얼마나 인체에 덜 유해한가에 대한 문제를 더 중요한 부분으로 인식하고 있다. 이에 따라 선진국을 중심으로 디젤 기관이나 산업용 가스터빈 등과 같은 연소 기관에서 발생하는 입자상물질이 대기로 배출되는 것에 대해서 강력한 규제를 실시하고 있다(Eyring et al., 2010).

하지만 선박 기관은 육상에 설치된 연소 기관과는 다르게 전 세계를 돌아다니면서 입자상물질을 배출하기 때문에 이를 규제하기 위해서는 각국의 노력도 중요하지만 국제 기구를 통한 규제가 필요하다. 이와 같이 선박 운항을 위해 작동되고 있는 엔진으로부터 발생하는 입자상물질의 규제 논의에 대해 IMO 회원국이자 해운강국인 우리나라 역시 국제 협약의 규제에서 벗어나기 어렵고, 또한 앞으로 제정되는 협약을 지속적으로 이행해야하는 상황을 고려해야만 한다. 최근 들어 선박 엔진 연소에 의한 입자상물질 규제에 대한 논의도 활발하게 이루어짐에 따라 규제 표준이 도출되었다(Choi et al., 2016).

육상에 비해 황함유량이 높은 연료유를 사용하는 선박에서는 연소과정에서 다량의 입자상물질이 배출될 수 있다. 입자상 물질의 생성은 연소기 내부의 온도, 혼합기 운동형태, 연료성분, 확산속도, 반응시간, 연료미립도 등의 요인에 따라 크게 변화하는 것으로 알려져 있다(Stanier, 2003). 최근에는 입자상 물질이 대기의 온난화 및 설빙(Snow and Ice)의 용해를 촉진하여 기후변화에 영향을 미칠 수 있다는 가능성이 다수 제기되고 있다. 그러나 입자상물질의 경우 대기 중 지속시간이 짧은 단주기 기후변화물질(Short-Lived Climate Forcer, SLCF)로 구분되기 때문에 기후 변화에 대해 정량적으로 얼마만큼 영향을 미치는지에 대해서는 많은 논란이 되고 있다.

이러한 선박 기관에 의한 입자상 물질을 규명하기 위한 첫 번째 단계로 선박 기관에 사용되는 연료유에 대한 매연 생성 매커니즘과 연소과정에서 발생하는 입자상물질의 특성에 대한 연구가 수행되어야 한다. 하지만 보통의 선박 디젤 기관은 압축 연소를 통해 배기가스를 배출한다. 정확한 측정을 위해서는 압축 연소 중에 배출되는 배기가스에 대한 정보를 구해야하지만 운항중인 선박의 디젤기관에서 압축 연소를 통해 배출되는 배기가스를 측정하기란 현실적으로 매우 힘들다.

그러므로 현장 실증 전에 선박 연료유에 대한 기초적인 데이터 구축을 위해 일반적인 연소장치인 Wick 버너를 사용

하여 연료유에 대한 입자상 물질의 체적분율 측정을 실시하였다. 이와 같은 경우 입자에 대한 광소멸을 측정하는 것이 일반적인 방법이고, 그에 따라 광소멸 계수를 정확히 알고 있어야 한다. 하지만 광소멸 계수는 연료에 따라 서로 다른 값을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 입자의 형상에 따라 광소멸 효과가 달라질 수 있는 것으로 보고되고 있다(Choi et al., 2014). 결국 실제 선박에서의 실험과 분석 작업 전에 여러 종류의 선박 연료유가 환경 및 건강에 미치는 기여도를 정량적으로 정확하게 이해하기 위해서는 기초 연구로서 같은 조건의 실험 환경 속에서 Wick 버너를 통해 배출되는 입자상물질의 광학적 특성 및 물리적 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 이를 통해 각 선박 연료유에서 배출되는 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_p$ )와 라만 특성을 포함하여 입자에 대한 형상 정보에 대한 연구가 반드시 필요하다. 따라서 본 연구에서는 1차적으로 선박 연료유의 연소 과정 시 발생하는 입자상물질의 기본적인 광학 특성인 광소멸 계수를 측정을 통해 제시하였다. 추가로 선박 연료유의 입자상물질 특성을 파악하고자 육상 디젤 기관에 사용하고 있는 연료유를 같은 실험 방법으로 무차원 광소멸 계수를 측정하였고, 두 연료유간의 비교 분석을 통해 차이점을 알아보았다.

## 2. IMO의 입자상 물질 규제 현황

MEPC 62차 회의에서는 국제 항해 선박의 BC(Black Carbon) 배출이 극지방에 미치는 영향에 대해 논의하기로 결정하였다(MEPC 62th, 2011).

PPR(해양오염방지대응 전문위원회: Sub-Committee on Pollution Prevention and Response) 1차 회의에서는 국제항해를 하는 선박에서 배출되는 BC에 의한 북극지방에 미치는 영향에 대해 논의하였다. 이를 위해 국제 항해 선박에서 배출되는 ① BC의 정의 정립, ② 측정 방법 도출, ③ 현실적인 제어 방법 도출 이렇게 3가지 였으나 정의를 정립하지 못한 관계로 ②, ③항에 대한 진전된 논의가 없었다. 다만, 정의 수립과 관련하여 제시된 4가지 정의 중 eBC (Equivalent Black Carbon) 및 LAC(Light-Absorbing Carbon) 두 개 중에서 정하는 것으로 정의를 좁히는데 합의하여 이를 MEPC에 보고하고 추가로 지침을 받는데 동의하였고 핵심 사항인 BC의 정의를 MEPC 67차 및 PPR 2차에서 재논의하는 것으로 결정하였다(MEPC PPR 1th, 2014).

MEPC 67차 회의에서는 외항을 항해하는 선박으로부터 배출된 BC가 북극해에 미치는 영향에 대한 논의가 있었는데, 일부 당사국들은 BC에 대한 정의에 대한 극소수의 의견만이 PPR 1차에 제시되었음을 지적하였다. PPR 1차에서 BC의 정의 및 검출 방식에 대한 상세한 권고 사항을 제시하지 않았음을 고려하여 이번 회의에서는 차기 PPR 2차에서의 추

## 선박 및 육상 디젤 엔진용 연료유에서 발생하는 입자상물질에 대한 무차원 광소멸계수 측정에 관한 연구

가 검토 및 단일의 BC 정의에 대한 명백한 권고 사항을 개발할 것을 지시하였다(MEPC 67th, 2014).

PPR 2차 회의에서는 BC의 정의가 극지방의 기후 변화에 적합하도록 도출되었으나, 선박의 엔진에서 배출되는 실측 데이터를 통해서 정의에 대한 추가적인 검토를 진행하기로 하였다. 실선 및 엔진 테스트를 통하여 다양한 BC 측정 방법을 연구하여 관련된 사항을 추가 검토하기로 하였고 핵심 사항인 BC의 정의를 MEPC 68차 및 PPR 3차에서 재 논의하기로 하였다(MEPC PPR 2th, 2015).

MEPC 68차 회의에서는 기존 연구인 'Bounding the role of black carbon in the climate system(Bond et al., 2013)'에서 제시한 BC의 정의가 국제 항해 선박의 BC 정의에 가장 적합하다고 결정하였다(MEPC 68th, 2015).

PPR 3차 회의에서는 BC 측정 및 제어 방법에 대한 초안을 만들기 위해서는 BC 배출 자료 수집이 필요하다는 판단하에 '측정보고 프로토콜(Measurement Protocol)'을 수립하고 자발적인 데이터 수집 및 연구에 대한 협력에 이 프로토콜을 적용하는 문제가 논의되었다(MEPC PPR 3th, 2016).

PPR 4차 회의에서는 연구 자료들을 검토하여 BC의 검토를 위한 작업 계획 및 정의 등에 지속적으로 논의하였는데, 정의는 기존 내용을 그대로 사용하기로 하였고 Work Plan를 마련하였다. PPR 5차에서 회기간 자료 수집을 위한 자발적 측정 연구의 보고 프로토콜 및 가장 적합한 측정 방법 식별에 대해 최종 승인하고, PPR 6차에서 위원회 검토를 위한 적합한 측정 제어 기술에 대한 제안의 검토 및 최종 승인하기로 하였다(MEPC PPR 4th, 2017).

### 3. 선박 연료유 성상 및 실험장치

#### 3.1 실험장치 및 방법

Fig. 1은 이번 실험에 사용된 버너 구조 그림과 실제 실험을 촬영한 사진이다. 실제 선박과 같이 고온 고압에서의 실험이 매우 어렵기 때문에 동축류 버너를 이용하였다.

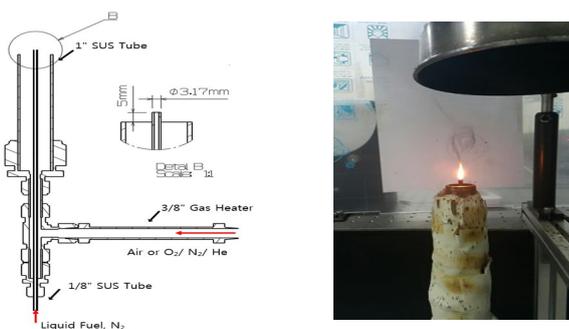


Fig. 1. Drawing (left) and picture (right) of co-axial diffusion burner.

Fig. 2는 동축류 버너의 연소를 통해 발생된 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 측정하기 위해 본 연구 과정에서 제작된 측정 장치의 개략도이다. 확산화염으로부터 생성되는 입자상물질의 양은 Wick 버너의 심지 높이를 조절함으로써 증발되는 연료량을 제어하는 방식으로 조절하였다.

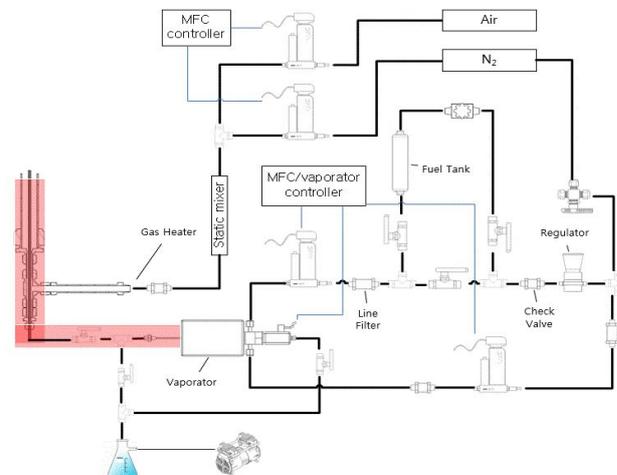


Fig. 2. Diagram of an experimental-setup for light extinction measurement.

버너 화염 끝단으로부터 방출되는 입자상물질은 공기와 혼합되어 Transmission Cell(TC) 안쪽으로 유입된다. TC를 통과하는 동안 입자상물질은 파장이 633 nm의 광원에 노출되어, 입사되는 광을 흡수하거나 산란하게 된다. 이 때 입자상물질에 의해 산란되는 광의 강도는 TC 측면의 정 중앙에 설치된 광전증폭관(Photomultiplier Tube, PMT)로 측정할 수 있다.

TC 하류 쪽에는 입자상물질 채집장치인 기공(Pore)크기가 0.7  $\mu\text{m}$ 의 광흡수 필터가 장착되어 공기와 혼합된 입자상물질만을 추출한다. 또한 필터 이후에 진공펌프가 설치되어 있고, 입자상물질이 필터에 걸러진 후 유입유량은 유량계로 측정된다.

TC를 통과하면서 레이저광의 강도는 광흡수와 광산란으로 인해 광소멸을 일으킨다. 이러한 광소멸을 측정하기 위해 광검출기가 설치되며, 광소멸의 정도를 정확히 측정하기 위해 광학필터, 데이터 수집장치 등이 부가적으로 설치되었다.

#### 3.2. 연료유 성상

이번 실험에 사용된 선박용/육상용 연료유의 성상을 Table 1에 정리하였다.

육상용 연료유의 밀도가 0.09083이고 선박용 연료유의 밀도가 0.8814로 약 0.02 정도 차이가 나며 이로 인해 동점도와 유동점에도 약간의 차이가 발생한다. 하지만 황분에서는

육상용이 0.25%, 해상용이 0.73%로써 약 3배 정도의 차이가 난다. 그 외 항목은 비슷한 분석 내용을 보여준다.

Table 1. Summary of thermo-chemical properties for marine fuel oil and land fuel oil

Analysis Item	Unit	Marine Fuel oil	Land-base Fuel Oil
Density (15°C)	g/m <sup>3</sup>	0.8814	0.9083
Carbon Residue	(m/m) %	2.17	2.68
Sulfur Content	(m/m) %	0.73	0.25
Water&Sediment	(v/v) %	0.05	0.05
Flash Point	°C	76.0	76.0
Ash Content	(m/m) %	0.006	0.016
Kinematic Viscosity (50°C)	mm <sup>2</sup> /s	4.948	11.95
Pour point	°C	-6.0	-12.0

### 3.3 광소멸계수(K<sub>e</sub>) 계산방법

입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 광원의 입사강도(I<sub>0</sub>)를 광검출기로 측정된 뒤 입자상물질이 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광원의 강도(I)를 측정하고 이 값들을 이용하여 계산한 광투과율(I/I<sub>0</sub>)을 Fig. 3에 표시하였다.

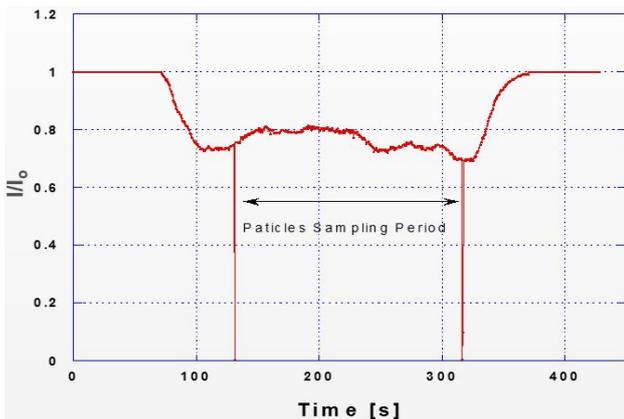


Fig. 3. Laser transmittance through the transmission cell.

Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 모든 실험조건에서 입자상물질이 포함된 공기가 유입되기 전과 공급이 중단된 이후의 광투과율은 일정하지만 유입이 시작된 직후부터 급격히 감소하여 곧 준정상상태(quasi-steady state)에 도달한다. 이 시간 동안 입자상물질에 대한 샘플링을 실시한다.

TC 하류에 설치된 밸브의 조작을 통해 광투과율이 준정상상태에 도달한 직후부터 일정시간동안 입자상물질 채집 장치에 설치된 필터를 통해 입자상물질을 포집하였다. 실험

전후의 필터의 질량변화를 정밀저울로 측정하여 채집된 수트의 질량을 얻었다. 이때 준정상상태에 도달한 평균 광투과율(I/I<sub>0</sub>)은 Bouguer 법칙에 의해 식 (1)로 나타낼 수 있다 (Choi, 2009).

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

식(1)에서 K<sub>e</sub>는 무차원 광소멸계수, f<sub>v</sub>는 광학적으로 측정된 입자상물질의 체적분율, λ는 광원의 파장 길이, L은 레이저의 경로길이를 의미한다. 한편, 본 실험에서 필터에 포집된 입자상물질인 수트는 식 (2)를 이용하여 체적분율 (Volume fraction), f<sub>vg</sub>로 환산하여 계산할 수 있다(Choi et al., 1995). 식(2)에서 m은 필터에 채집된 입자상물질의 질량, V는 TC에 유입된 공기의 유량, t는 채집시간, ρ는 입자상물질의 밀도를 나타낸다.

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

입자상물질의 밀도는 연료와 상관없이 널리 사용되는 수트 입자의 밀도값(1.7 g/cm<sup>3</sup>)을 적용하였다(Choi et al., 1995). 또한 식(1)의 보우거(Bouguer) 법칙에 따라 측정된 광투과율(I/I<sub>0</sub>)을 식(2)에 대입하여 입자상물질의 체적분율을 결정할 수 있다. 본 실험에서는 동일한 시간대에 TC안에서 식(1)과 식(2)를 이용하여 입자상물질의 체적분율을 각각 측정하였으므로 두 가지 방법으로 측정된 체적분율은 같아야 한다. 이에 따라 두 식의 관계를 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<sub>e</sub>는 식(4)을 통해 최종 계산할 수 있다(Choi et al., 1995; Zhu et al., 2000; Choi, 2009).

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

식(4)에서 TC 안쪽으로 유입된 가스가 필터를 통과하게 되는데 이때의 유량을 측정하게 된다. LSD4는 유량 변화에 따른 계측기의 전압변화량을 나타낸다.

채집시간 동안 입자상물질이 필터에 퇴적됨에 따라 필터 선단과 후단의 압력차로 인해 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 유량의 변화에 따른 계측 장치의 전압 변화가 불가피하게

선박 및 육상 디젤 엔진용 연료유에서 발생하는 입자상물질에 대한 무차원 광소멸계수 측정에 관한 연구

된다. 이러한 변화를 고려하기 위해 광소멸계수( $K_e$ ) 계산에 사용된 유량값은 샘플링시간 동안의 평균 유량을 사용하였다. 이 값을 식(4)에 곱하여, 최종적으로 광소멸계수( $K_e$ )값을 구하였다.

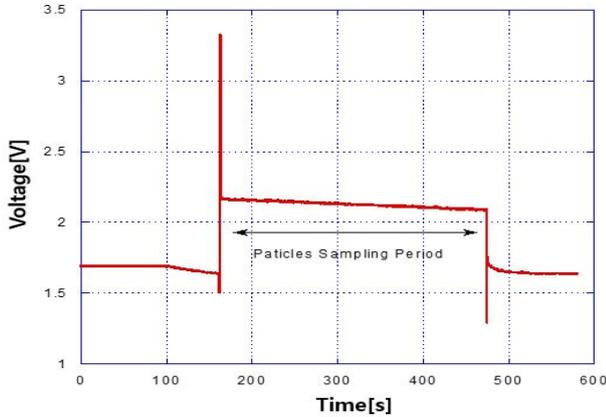


Fig. 4. Schematic diagram about voltage change with flow rate.

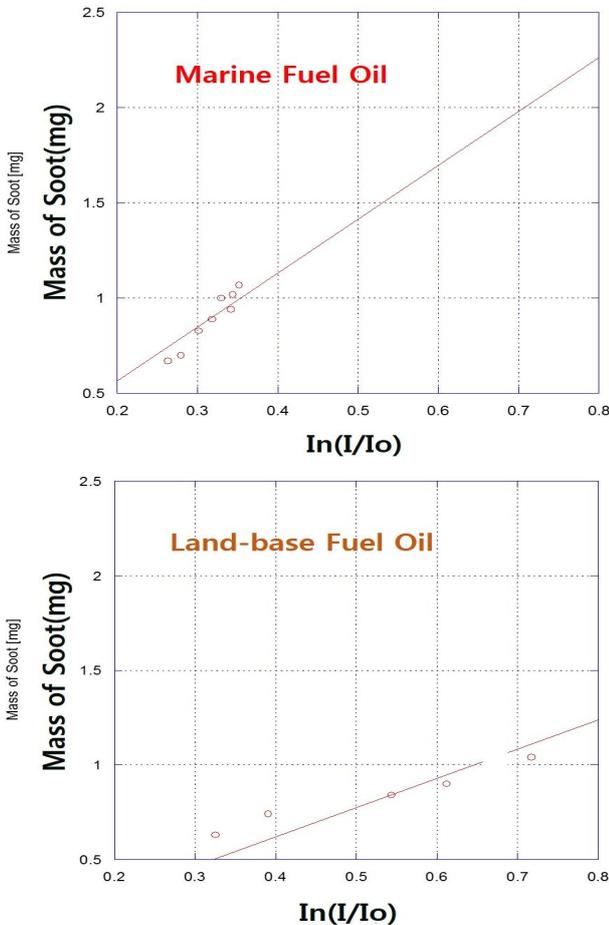


Fig. 5. Measured mass of particle matter on the filters plotted versus  $\ln(I/I_0)$ .

#### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5에는 필터에 채집된 입자상물질의 질량과 채집시간 동안 얻어진  $\ln(I/I_0)$  평균값과의 상관관계가 도시되어있다. Fig. 5에서 나타내는 바와 같이 TC 안쪽으로 유입된 입자상물질의 양이 증가함에 따라  $\ln(I/I_0)$  평균값이 선박용 연료유의 경우에는 0.26(optically-thin)에서 0.35(optically-thick) 사이에서 선형적으로 변화하고, 육상용 연료유의 경우에는 0.33에서 0.71사이에서 변화하고 있음을 보여주고 있다.

그리고 Table 2에는 Fig. 2에 도시되어 있는 광검출기를 이용하여 측정된 광투과율( $-\ln(I/I_0)$ ) 값을 식(4)에 대입하여 계산된 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 정리한 결과이다.

Table 2. Summary of measured  $K_e$  for marine fuel oil and land fuel oil

$-\ln(I/I_0)$	Land-base Fuel Oil $K_e$	$-\ln(I/I_0)$	Marine Fuel Oil $K_e$
0.33	8.3	0.26	8.0
0.39	8.4	0.30	8.1
0.54	8.2	0.31	7.9
0.67	8.5	0.32	7.9
0.71	8.8	0.35	8.3
	8.44		8.28

이렇게 계산된 광소멸계수( $K_e$ )의 평균값은 Fig. 6에서와 같이 선박용 연료유의 경우 8.28이고, 육상용 연료유의 경우 8.44이다.

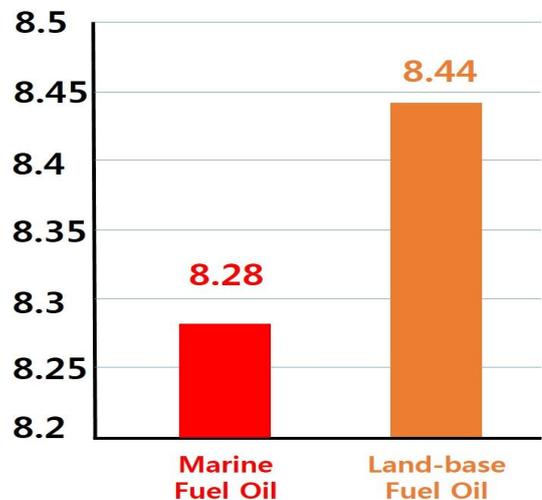


Fig. 6. Comparison of dimensionless light extinction constant for marine fuel oil and land fuel oil.

그러나 식(4)을 이용하여 광소멸계수( $K_e$ )를 계산하는 경우 측정에 대한 불확도(Uncertainty)가 생기는데 이것은 식(4)에 포함되어 있는 각 측정 인자의 계측하는 과정에서 발생한다.

식 (5)를 통해 측정 인자를 계측하기 위해 사용된 계측기의 최대 측정 오차범위와 문헌에 제시되어 있는 입자상물질 밀도의 측정 오차범위( $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ )를 적용하여(Choi et al., 1995) 계산하였으며, 계산된 측정 불확도는  $\pm 10.1\%$ 이다.

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

식(5)에서  $\delta K_e$ 는 무차원 광소멸계수의 측정 불확도,  $S_n$ 은 식(3)에 제시된 각각( $n = 6$ 개)의 측정 인자,  $\delta S_n$ 은 각 측정 인자의 최대 측정오차를 의미한다.

Fig. 6에서 보듯이 633 nm 파장대역에서 선박용 연료유에서 생성된 입자상물질의 평균 광소멸계수( $K_e$ )값은 8.28이고 육상용 연료유의 경우 평균 광소멸계수( $K_e$ )값은 이보다 약간 큰 8.44이지만 측정 불확도 범위 내에 있으므로 거의 유사한 값을 갖고 있다고 할 수 있다.

비교 분석을 위해 Rayleigh limit 해법식 식(6)을 이용하여 계산하였다. Rayleigh limit 해법식은 연소 분야나 자동차 분야에서 일반적으로 광소멸법을 이용하여 입자상물질의 체적분율을 측정하는 경우 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 계산하기 위해 이용된다.

$$K_e = \frac{36\pi nk}{(n^2 - k^2 + 2) + 4n^2k^2} \quad (6)$$

식(6)에서  $n$ 와  $k$ 는 입자상물질의 굴절지수(refractive index,  $m = n - ik$ )를 의미하며, 이 때 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 계산하기 위해서 자주 인용되는 굴절지수는 1.68-i0.56 (Marley et al., 2001)이다. 이 값을 대입하여 얻어진 광소멸계수( $K_e$ )값은 4.5인데 실험을 통해 얻은 값보다 2배 정도 작은 수치이다.

Rayleigh limit 해법에서는 입자에 의한 광흡수만을 고려하여 계산하게 되므로 본 실험을 통해 측정된 값과는 차이가 발생하는데 이것은 앞부분에서 설명하였듯이 입자상물질에 의한 광소멸은 광흡수와 광산란을 모두 영향이 있음을 나타낸다. 이는 곧 선박용 및 육상용 연료유가 사용되는 경우 입자상물질의 광소멸 과정에서 광산란의 비중을 무시할 수 없다는 것을 의미한다.

또한 Fig. 5의 그래프에서 특이점을 보이는 부분이 있는데 육상용 연료유의 입자상물질에 비해 선박용 연료유 입자상

물질의 유입량이 더 적어야 동일한 광투과율에 도달한다는 점이다. 이는 선박용 연료유와 육상용 연료유에서 발생하는 입자상물질의 광소멸 특성이 서로 상이할 수 있음을 의미한다. 통상 광흡수 특성은 입자상물질의 탄소 구조 배열특성에 의해 영향 받을 수 있는 것으로 알려져 있고(Andreae and Gelencser, 2006) 이로 인해 광소멸계수( $K_e$ )값이 변화할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Choi, 2009).

## 5. 결론

연소 장치를 통해 생성된 선박용 및 육상용 연료유의 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )를 633 nm 레이저를 이용하여 측정하고, 중력식 필터법에서 수집된 입자상물질의 체적분율을 계산하여 비교하였다. 선박용 연료유와 육상용 연료유에서 측정된 입자상물질의 무차원 광소멸계수,  $K_e$ 는 각각 8.28과 8.44로 측정 불확도 범위 내에서 거의 유사함을 확인하였지만, Fig. 5의 그래프를 통해 광소멸 특성은 서로 상이할 수 있음을 파악하였다. 추가로 레일리 리미트(Rayleigh limit) 해법식을 통해 구한 광소멸계수( $K_e$ )값과의 비교를 통해 광소멸 과정에서 광흡수의 영향뿐만 아니라 광산란 영향 또한 무시할 수 없음을 확인하였다. 차후 육상용 연료유와 비교하여 선박용 연료유에서 발생하는 입자상물질의 광소멸 특성을 정확히 이해하기 위해서는 Spectroscopy와 고분해능전자현미경 분석을 통해 탄소 배열구조 및 입자상물질의 형상정보에 대한 심화 연구가 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 국내외적으로 극히 제한적으로 연구되고 있는 선박 디젤 기관에 사용되는 연료유에서 배출되는 입자상물질의 광소멸계수( $K_e$ )값과 육상 디젤 엔진에 사용되는 연료유의 광소멸계수( $K_e$ )값을 측정 제시하였다. 또한 633 nm의 광원을 이용하여 입자상물질의 체적분율을 측정할 경우 유용하게 사용할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업입니다. (no.2017R1A2B4006194)

## References

- [1] Andreae, M. O. and A. Gelencser(2006), Black Carbon or Brown Carbon? The Nature of Light-absorbing Carbonaceous Aerosols, Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 6, pp. 3131-3148.

- [2] Bond, T. C., S. J. Doherty, D. W. Fahey, P. M. Forster, T. Berntsen, B. J. DeAngelo, M. G. Flanner, S. Ghan, B. Kärcher, D. Koch, S. Kinne, Y. Kondo, P. K. Quinn, M. C. Sarofim, M. G. Schultz, M. Schulz, C. Venkataraman, H. Zhang, S. Zhang, N. Bellouin, S. K. Guttikunda, P. K. Hopke, M. Z. Jacobson, J. W. Kaiser, Z. Klimont, U. Lohmann, J. P. Schwarz, D. Shindell, T. Storelvmo, S. G. Warren and C. S. Zender(2013), Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Volume 118, Issue 11, pp. 5380-5552.
- [3] Choi, J. H., I. S. Cho, J. S. Lee, S. K. Park, W. J. Lee, H. Kim, H. J. Chang, J. Y. Kim, S. Jeong and S. H. Park(2016), Characterization of carbonaceous particulate matter emitted from marine diesel engine, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(5), pp. 2011-2017.
- [4] Choi, J. H., S. C. Choi, D. Y. Kim, J. H. Lee, S. K. Park(2014), An Experimental Study on Optical and Physical Properties of Particulate Matter produced from F-76 Marine Diesel and JP-8 Aviation Fuels, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 20(6), pp. 781-787.
- [5] 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.
- [6] 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. Drexel University.
- [7] Eyring, V., I. S. A. Isaksen, T. Berntsen, W. J. Collins, J. J. Corbett, O. Endresen, R. G. Grainger, J. Moldanova, H. Schlager and D. S. Stevenson(2010), Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping, *Atmos. Environ.* 44, pp. 4735-4771.
- [8] Marley, N. A., J. S. Gaffney, J. C. Baird, C. A. Blazer, P. J. Drayton and J. E. Frederick(2001), An Empirical Method for the Determination of the Complex Refractive Index of Size Fractionated Atmospheric Aerosols for Radiative Transfer Calculations, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 34, pp. 535-549.
- [9] MEPC 62th(2011), Korean Register Technical Information of IMO, 2011, Result of IMO Meeting MEPC 62th.
- [10] MEPC 67th(2014), Korean Register Technical Information of IMO, 2014, Result of IMO Meeting MEPC 67th.
- [11] MEPC 68th(2015), Korean Register Technical Information of IMO, 2015, Result of IMO Meeting MEPC 68th.
- [12] MEPC PPR 1th(2014), Korean Register Technical Information of IMO, 2014, Briefings of IMO Meeting PPR 1th.
- [13] MEPC PPR 2th(2015), Korean Register Technical Information of IMO, 2015, Briefings of IMO Meeting PPR 2th.
- [14] MEPC PPR 3th(2016), Korean Register Technical Information of IMO, 2016, Briefings of IMO Meeting PPR 3th.
- [15] MEPC PPR 4th(2017), Korean Register Technical Information of IMO, 2017, Briefings of IMO Meeting PPR 4th.
- [16] Stanier, C. O.(2003), Ultrafine Particles in the Atmosphere: Formation, Emissions and Growth, Ph.D. thesis, Carnegie Mellon University.
- [17] 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 : 2018. 02. 23.

Revised : 2018. 04. 10.

Accepted : 2018. 04. 27.