

입자상물질의 광학밀도 및 농도측정에 적용된 저가형 광학 부품의 성능평가

백영조 · 홍터기* · 황철홍** · 박설현***

조선대학교 산업융합기술대학원 · *조선대학교 대학원

대전대학교 소방방재학과 · *조선대학교 기계시스템 · 미래자동차공학부

(2016. 6. 14. 접수 / 2016. 7. 29. 수정 / 2016. 10. 24. 채택)

Performance Evaluation of Low- cost Optical Components used for Measuring the Optical Density and Concentration of Particulate Matter(PM)

Young Jo Baik · Terki Hong[†] · Cheol Hong Hwang^{**} · Seul Hyun Park^{***}

Graduate School of Industrial Technology, Chosun University

*Graduate School of Chosun University

**Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

***School of Mechanical System and Automotive Engineering, Chosun University

(Received June 14, 2016 / Revised July 29, 2016 / Accepted October 24, 2016)

Abstract : The performance of a set of low-cost optical components used for measuring the optical density of PM particles was evaluated in the present study. To this end, the set of low-cost optical components was replaced with that of general optical components used to measure the PM optical density under identical experimental conditions. The optical densities measured from the set of general optical components were then compared to those obtained from the set of low-cost optical components. While the optical density is measured, another key parameter, the dimensionless extinction constant of PM particles (which is needed to optically measure the PM concentration) was also determined in the present study. The experimental results indicate that the optical density and PM concentration measurements performed by low-cost optical components are feasible, producing trackable variations in the OD and concentrations compared to values obtained from the set of general optical components.

Key Words : particulate matter (PM), optical density (OD), PM concentration, dimensionless light extinction constant

1. 서론

산업혁명 이후 화석연료의 사용이 급증하면서 대기 오염은 사회적인 이슈로 부상하고 있다. 이에 대응하여 세계 각국은 이상 기후의 한 원인으로 손꼽히고 있는 대기오염을 방지하고자 노력을 경주하고 있다. 특히, 대기오염의 주요 배출원 중 하나로 지목되고 있는 자동차 배출물에 대한 규제가 활발히 이루어지고 있다. 자동차로 부터 배출되는 대표적인 유해 물질로는 일산화탄소(CO), 탄화수소(THC), 질소산화물(NO_x), 입자상물질(Particulate Matter, PM) 등을 들 수 있다. 최근 들어서는

디젤 자동차의 연소과정에서 발생하는 입자상물질 중 직경이 2.5 μm 이하의 입자상물질이 대기오염 물질로서 주목을 받고 있다¹⁾. 입자상물질은 주로 고체 탄소(elemental carbon, EC)로 이루어져 있으며, 다른 기타 성분들이 표면에 붙어있는 것으로 보고되고 있다²⁾. 특히 입자상물질과 같이 미세입자의 경우 인체에 미치는 영향은 중량이 적어도 입자가 작아 인체의 세포에 침착성이 강하며 기도에서 걸러지지 않고 바로 폐에 흡수되어 축적되고 혈관을 통해 전파될 수 있어 사람의 호흡계 및 심장계 질환의 원인이 되는 것으로 보고되고 있다³⁾. 현재의 입자상물질의 규제는 중량분포를 기준으로 하

[†] Corresponding Author : Seu-Hyun Park, Tel : +82-62-230-7174, E-mail : isaac@chosun.ac.kr

School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, Korea

고 있지만 nm 크기의 입자가 μm 크기의 입자에 비해 인체에 유해도가 크다는 사실이 보고되면서 입자상물질의 규제방식은 중량규제뿐만 아니라 수량규제도 병행되는 것이 합리적인 것으로 인식되고 있다⁴⁾.

이와 같이 자동차 연소과정을 통해 배출되는 입자상물질의 규제가 증가함에 따라 이를 획기적으로 저감하기 위해 여과장치 및 후처리와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다^{4,5)}. 이 과정에서 후처리 특성 상 배출되는 입자의 측정과 그 과정에 대한 이해가 반드시 필요하게 된다. 따라서 차량용 내연기관에서 배출되는 입자상물질의 측정과 결과의 해석은 입자의 특성과 연관되어 이루어져야 한다.

자동차에서 배출되는 입자상물질의 농도를 측정하는 방법에는 필터를 이용하여 직접 샘플링 하는 중량분석법(gravimetric method)이 있다. 하지만 중량분석법은 측정과정의 번거로움으로 인해 입자에 의한 광소멸을 이용하는 방식이 보다 일반적으로 사용되고 있으며, 다양한 장비들이 개발되어 정비소 또는 실차 시험에서도 사용되고 있다. 대표적으로 광학식 매연측정기(smoke meter)는 입자상물질에 의해 발생하는 불투명도(opacity)를 측정하는 장치의 일종이다. 매연측정기는 차량의 배기관에 장착되어 배출되는 배기가스에 포함되어 있는 입자상물질에 의해 발생하는 빛의 감쇄(light attenuation)를 측정하게 된다. 이 때 빛의 감쇄는 광투과율로 측정되며 일반적으로 백분율로 표시된다. 0% 광투과율은 깨끗한 공기, 그리고 100% 광투과율은 무한대의 매연(infinite smoke)을 나타낸다.

앞서 기술한 것처럼 매연측정기를 사용하게 되면 광투과율의 정보를 통해 입자 농도가 높고 낮음의 정도인 광학밀도를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 매연측정기와 유사한 형태의 실험 장치를 구성하고 매연측정 장치의 핵심부품인 광학계(발광부/수광부)의 성능을 저가형의 레이저와 광검출기의 조합을 통해 구현할 수 있는지를 평가해 보았다. 아울러 광투과율의 정보를 바탕으로 정량적인 입자의 농도를 예측하기 위해서 필요한 입자상물질의 무차원 광소멸계수를 실험적인 방법으로 측정해 보았다.

2. 실험장치의 구성 및 실험방법

본 연구에서 입자상물질을 발생시키기 사용된 연료는 디젤 연료의 기준연료(Reference Fuel)로 알려진 순도 99.9% 이상의 n-heptane이다. 입자상물질은 Wick버너의 연소과정에서 생성되며, Wick버너 화염 끝단으로부터 방출되는 입자상물질은 공기와 혼합되어 Transmission

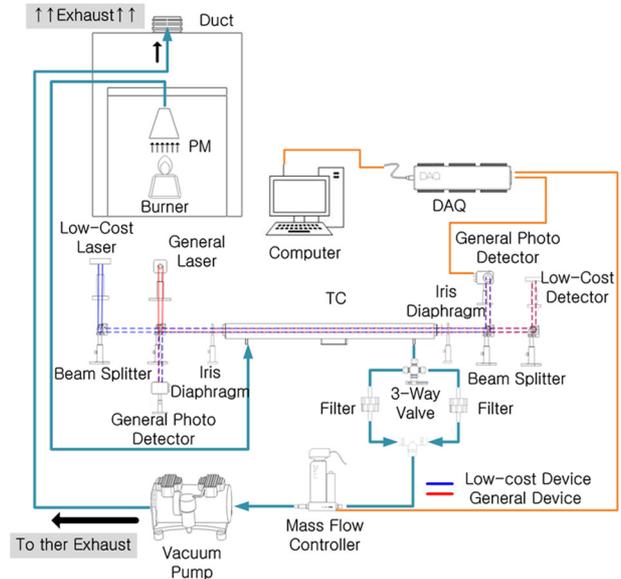


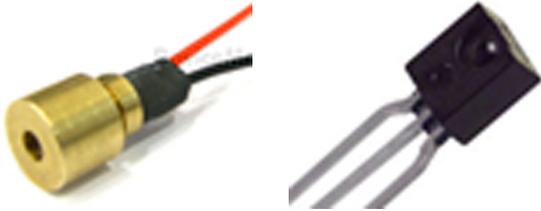
Fig. 1. Schematic diagram of an experimental setup.

Cell (TC) 안쪽으로 유입된다. 확산화염으로부터 생성되는 입자상물질의 양은 Wick버너의 심지 높이를 조절함으로써 증발되는 연료량을 제어하는 방식으로 조절하였다.

Fig. 1에 도시되어 있는 TC는 $0.8\text{ m} \times 0.08\text{ m} \times 0.08\text{ mm}$ 의 직육면체의 형태로 알루미늄으로 제작되었으며 내부에는 무광 흑색 페인트를 도포하여 표면에 의한 빛의 반사나 산란을 억제할 수 있도록 하였다. 생성된 입자상물질은 TC에 유입되어 TC의 양 끝면에 설치된 광학 창을 통해 투과하는 레이저 광원에 노출되게 된다. 입자상물질은 TC를 통과하는 동안 광원의 입사광에 노출되어, (입사되는) 광을 흡수하거나 산란하게 된다. TC의 하류 쪽에는 진공펌프(vacuum pump)가 설치되어 공기와 혼합된 입자상물질이 TC 안쪽으로 유입될 수 있도록 TC 상류의 입구와 하류 출구 사이에 압력 차를 발생시킨다. 또한 TC 하류 선단에는 입자상물질의 채집 장치가 설치되어 있으며, 채집 장치에는 기공(Pore)의 크기가 $0.7\ \mu\text{m}$ 인 유리섬유 필터가 장착되어 공기와 입자상물질이 혼합된 유동으로부터 입자상물질만을 추출하도록 설계되어 있다. 이 때 입자상물질의 축적으로 발생할 수 있는 필터 양단의 압력 차를 보상하고 실험이 실시되는 동안 TC안으로 유입되는 공기의 유량이 일정하게 유지되도록 필터 후단에는 질량유량계(mass flow meter, MFC)를 설치하였다. 채집 실험은 충분한 양의 입자상물질이 필터에 채집될 수 있도록 실험 조건에 따라 약 5분 동안 지속하였으며, 필터에 채집된 입자상물질의 질량은 정밀저울을 이용하여 측정하였다. 입자상물질의 질량은 채집 실험 전 필



a) image of a set of general optical components



b) image of a set of low-cost optical components

Fig. 2. Images of laser and photo detector used to measure the transmitted laser intensity ratio.

터의 무게를 측정하고, 채집 실험을 마친 후 필터의 무게를 각각 측정하여 각 필터 무게의 차를 이용하여 측정하였다.

기본적으로 입자상물질의 광투과율을 측정하기 위해 사용된 광학부품은 측정의 신뢰성 확보를 위해 비교적 고가인 레이저 (Thorlab S2011)와 광검출기(Thorlab PDA100)를 사용하였으며, 본 논문에서는 이 구성을 일반형 장치(레이저/광검출기)로 명명하였다. 아울러 Fig. 2에 제시되어 있는 바와 같이 주위에서 쉽게 구입하여 일반형 장치를 대체할 수 있는 레이저 모듈(LB650)과 광검출기(TSL12S)로 구성된 저가형 장치를 이용하여 측정된 광투과율을 동일한 실험조건에서 일반형 장치로부터 측정된 광투과율과 서로 비교 분석하였다.

Fig. 3은 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 일반형 장치와 저가형 장치의 레이저 입사강도 (I_0)를 각각의 광검출기로 측정하는 뒤 입자상물질이 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광원의 강도(I)를 측정하여 계산한 광투과율(I/I_0)을 도시한 것이다. 그림에 도시되어 있는 바와 같이 입자상물질과 혼합된 공기가 TC에 유입되기 전과 공급이 중단된 뒤의 광투과율(I/I_0)은 항상 일정하였다. 또한 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입이 시작된 직후부터 광투과율은 급격히 감소하여 곧 준정상상태 (quasi-steady state)에 도달하였다.

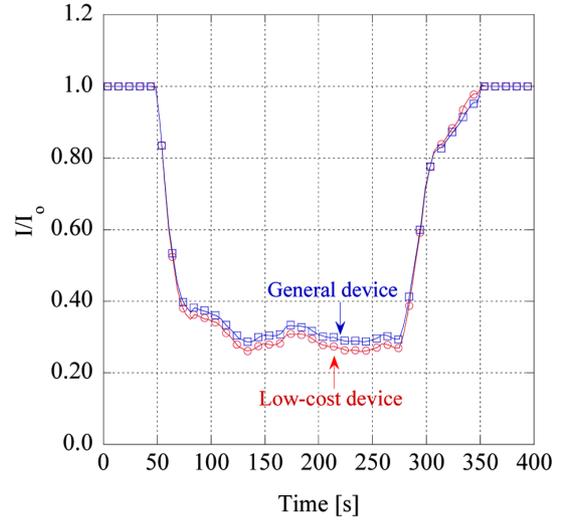


Fig. 3. Typical transmitted laser intensity ratio measured as a function of time.

3. 실험결과 및 고찰

일반적으로 사용되는 입자상물질의 농도 측정장치인 광학식 매연 측정장치의 경우 식(1)에 제시된 광학밀도(optical density)를 이용하여 입자의 농도가 높고 낮음을 상대적으로 표시하게 된다⁶⁾.

$$OD = -\frac{1}{L} \log\left(\frac{I}{I_0}\right) [m^{-1}] \quad (1)$$

식(1)에서 L은 광원의 경로거리이다. Fig. 4는 TC에 입자상물질이 유입되는 동안 광학밀도의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 입자상물질이 TC안으로 유입됨에 따라 광학밀도는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Case I ~ Case III의 비교를 통해 알 수 있는 바와 같이 TC로 유입되는 입자상물질이 증가함에 따라 광학밀도도 역시 증가됨을 볼 수 있다. 광투과율을 식(1)에 적용하여 계산한 광학밀도는 일반형 장치와 저가형 장치가 서로 정량적인 차이를 보이고 있지만, 광학밀도 변화의 추이는 모든 조건 (Cases I, II, and III)에서 동일하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다.

한편, TC로 유입되어 필터에 채집된 입자상물질의 농도, f_{vg} 는 식(2)을 이용하여 계산할 수 있다⁷⁾.

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

식(2)에서 m 은 필터에 채집되어 정밀 저울로 측정된

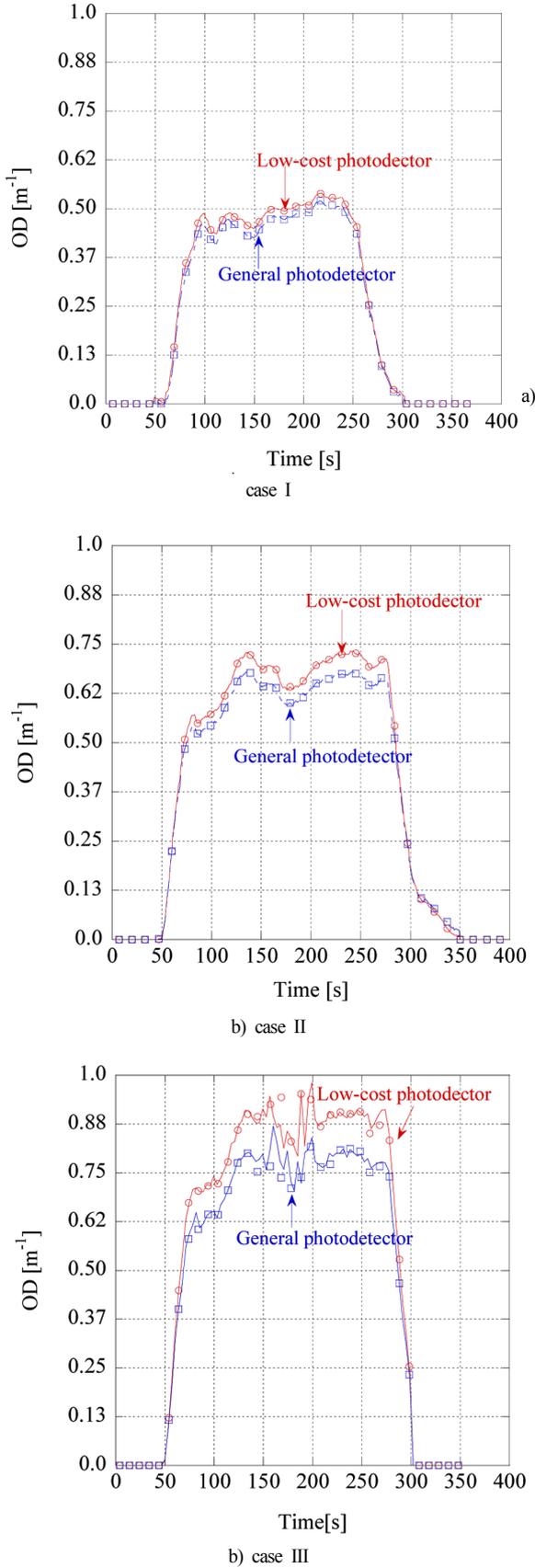


Fig. 4. Variations in the OD as a function of time.

Table 1. Summary of calculated average OD values and PM concentration for each of experimental cases

	Device	Volume fraction [ppm]	Avg. OD [m^{-1}]
Case I	Low cost device	0.037	0.49
	General device		0.47
Case II	Low cost device	0.050	0.68
	General device		0.64
Case III	Low cost device	0.059	0.89
	General device		0.76

입자상물질의 질량, I 는 TC에 유입된 공기의 유량으로 본 연구에서는 질량유량계를 이용하여 실험이 지속되는 동안 동일하게 유지되었다. t 는 입자상물질의 채집 시간, ρ 는 입자상물질의 밀도이다. 입자상물질의 밀도는 널리 사용되는 soot입자의 밀도값 (1.7 g/cm^3)을 이용하였으며⁸⁾, 계산 결과는 Table 1에 정리되어 있다. Table 1를 통해서도 Case 간에 평균 광학밀도 값이 증가함에 따라 일반형 장치와 저가형 장치에서 계산된 광학밀도의 차이가 유입된 입자상물질의 농도가 일정함에도 불구하고 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

일반형 장치와 저가형 장치에서 계산된 광학밀도의 차이를 규명해 보기위해서 광검출기의 응답성을 살펴 보았다. 광검출기의 응답성은 단위입력 광원의 강도 (watt)에 응답하는 출력 전류(전압)의 출력특성으로 나타낼 수 있으며, 실험에 사용된 광검출기의 응답성을 광원의 파장의 함수로 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 도시되어 있는 바와 같이 일반형 광검출기의 경우 대략 파장이 근적외선 근처인 1000 nm 영역에서 가장 강한 응답성을 나타내지만 이에 반해 저가형 광센서는 대략 800 nm에서 가장 강한 응답성을 나타내었다. 결국, TC에 유입된 입자상 물질이 농도가 증가할수록 계산된 광학밀도의 차이가 증가하는 현상은 일반형 광검출기와 저가형 광검출기 간의 상이한 응답성에 기인한 것으로 사료된다. 본 연구에서 광원으로 사용된 일반형 레이저와 저가형 레이저 모듈의 파장이 각각 635와 650 nm이기 때문에 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 800 nm 근처에서 가장 뚜렷한 응답성을 보이는 저가형의 광센서가 입사광의 크기변화에 더욱 민감하게 반응할 수 있고, TC로의 입자상물질의 유입이 증가함에 따라 광투과율 (I/I_0)의 크기가 더 낮아질 수 있다. 이 결과, Case별로 TC로 유입되는 입자상물질의 농도는 동일하지만 일반형 광검출기에 비해 저가형 광검출기를 통해 측정된 광학밀도가 높게 측정되는 것으로 판단된다.

아울러, Table 1에 주어진 각각의 평균 광학밀도와 입자상물질의 고유 광학특성인 무차원 광소멸계수

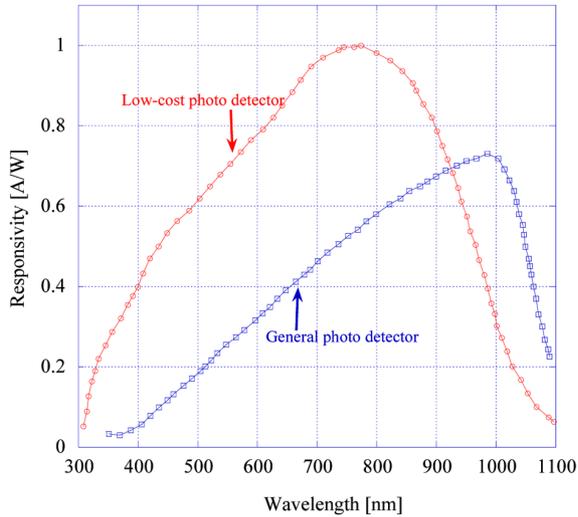


Fig. 5. Responsivity of photo detectors used to measure transmitted laser intensity ratio.

(dimensionless light extinction constant, K_e)를 결합하여 식(3)에 적용하면 광학적 방법으로 입자상물질의 농도 계산할 수 있다.

$$PM\ concentration = OD \times \frac{\lambda}{K_e} = - \frac{\lambda \log\left(\frac{I}{I_0}\right)}{LK_e} \quad (3)$$

식(3)에서 λ 는 광원의 파장이며, 무차원 광소멸계수는 Fig. 6에 도시되어 있는 바와 같이 TC안으로 입사된 광량이 입자상물질에 의해 흡수되거나 산란되어 소멸되는 양을 의미하는 무차원 수이다. 식(3)을 이용하여 광학적으로 계산된 입자상물질의 농도는 필터로 채집한 입자상물질의 농도 f_{eq} (식 2)와 동일한 시간대에 측정하였으므로 같아야 하고 이 관계로부터 입자상 물질의 무차원 광소멸계수를 역산하면 약 10.0 ± 1.0 이며, 탄화수소계 연료의 광소멸계수 값으로 보고된 8~11⁷⁻⁹⁾과 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 무차원 광소멸계수는 연료의 종류별로 상이한 것으로 알려져 있으며, 연소조건에 따라 상이한 것으로 보고되고 있으므로 광학식 매연 측정기를 이용하여 정량적인

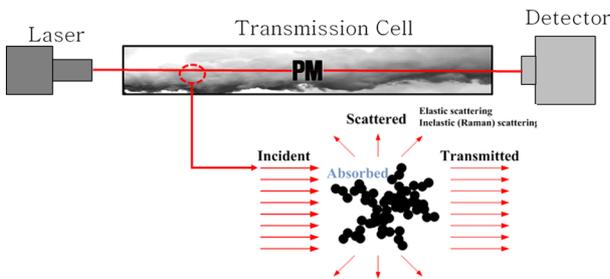


Fig. 6. Schematics of light extinction by PM particles.

농도를 측정하기 위해서는 입자상 물질의 무차원 광소멸계수 값을 신중하게 고려하여 선정해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 디젤의 기준연료인 n-heptane 증류화산화염을 통해 입자상 물질을 발생시키고 TC로 유입시켜 광학밀도를 측정하였다. 또한 TC에 유입된 입자상 물질을 증력식 필터법으로 농도를 측정된 뒤 광학적인 방법으로 측정된 농도와 비교하여 무차원 광소멸계수를 계산하였다. 계산된 n-heptane 입자상물질의 무차원 광소멸계수는 10.0 ± 1.0 으로 탄화 수소계 연료의 무차원 광소멸계수로 문헌에 보고된 8~11과 유사하였다.

아울러 본 연구에서는 기존 광학식 매연측정기의 광원 및 수광부를 저가형으로 제작해 보고자 관련 기초 연구를 수행하였으며, 이를 위해 TC에 장착되어 있는 일반형 광학 부품(레이저 및 광검출기)를 저가형 레이저 모듈과 광검출기로 대체하여 그 성능을 비교·분석해 보았다.

저가형으로 교체한 광학계를 통해 측정된 광학밀도의 변화도 일반형 레이저와 광검출기를 통해 측정된 광학밀도의 변화와 동일한 경향을 보였다. 다만 일반형 광검출기를 통해 측정된 광학밀도가 저가형 광검출기를 이용한 경우에 비해 다소 낮게 나타났고 TC에 유입된 입자상물질의 농도가 증가할수록 그 차이가 증가하였다. 이는 일반형 광검출기는 근적외선 영역인 약 1000 nm에서 최고의 응답성을 보이는 반면 저가형 광검출기는 가시광선 영역인 약 800 nm에서 최적의 응답성을 보이기 때문으로 사료된다. 즉 본 연구에서 광투과율(광학밀도)를 측정하기 위해 사용한 광원은 일반형과 저가형 모두 633~650 nm의 파장대역을 사용하기 때문에, 저가형 광검출기의 응답성이 주어진 파장대역에서 높고, TC로 유입되는 입자상물질의 농도가 증가할수록 저가형 광검출기로 측정된 광학밀도가 높게 되는 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 국민안전처 소방안전 및 119 구조·구급기술연구개발사업 (MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1) D. Park, Y. Yoon, S.B. Kwon, W. Jeong, Y. Cho and K.Lee, "The Effects of Operating Conditions on Particulate Matter Exhaust from Diesel Locomotive Engines", Science of The

- Total Environment, Vol. 419, No. 1, pp. 76-80, 2012.
- 2) D. Paraskevopoulou, E. Liakakou, E. Gerasopoulos, C. Theodosi and N. Mihalopoulos, "Long-term Characterization of Organic and Elemental Carbon in the PM_{2.5} Fraction: the Case of Athens, Greece" Atmos. Chem. Phys., Vol. 14, pp.13313-13325, 2014.
 - 3) E. Sasser et al., "Report to Congress on Black Carbon", United States Environmental Protection Agency (EPA), 2012.
 - 4) S. J. Jeong and C. H. Lee, "A Study on the Injection Characteristics of Urea Solution to Improve deNO_x Performance of Urea-SCR Catalyst in a Heavy Duty Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.165-172, 2008.
 - 5) H. Kim, B. Han and Y. Kim, "Evaluation on Performance of an Electrostatic Diesel PM Trap Device and Its Application to Diesel Engine After-treatment", Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 6, pp.176-183, 2008.
 - 6) P. A. Rubini, Q. Zhang and J.B. Moss, "Simulation of Visibility in Smoke laden Environments", InterFlam 2007, 11th International Conference on Fire Science and Engineering, London, UK, 2007.
 - 7) J.Y. Zhu, M.Y. Choi, G.W. Mulholland and L.A. Gritz, "Measurement of Soot Optical Properties in the Near-infrared Spectrum", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.43, pp. 3299-3303, 2000.
 - 8) M.Y. Choi, G.W. Mulholland, A. Hamins and T. Kashiwagi, "Comparisons of Soot Volume Fraction using Gravimetric and Light Extinction Techniques", Combustion and Flame, Vol.102, pp. 161-169, 1995.
 - 9) Z. G. Habib and P. Vervisch, "On the Refractive Index of Soot at Temperature", Combust. Sci. and Tech., Vol 59, pp. 261, 1988.