





2016년 2월 석사학위 논문

광학식 매연입자 농도 측정 장치의 성능평가에 관한 실험적 연구

조선대학교 산업융합기술대학원 융합자동차공학과 백 영 조



광학식 매연입자 농도 측정 장치의 성능평가에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of the Performance Evaluation of an Optical Device for Measuring Smoke Concentrations

2016 년 2 월 일

조선대학교 산업융합기술대학원 융합자동차공학과 백 영 조





저가형 광학식 매연입자 농도 측정 장치의 성능평가에 관한 실험적 연구

지도교수 박 설 현

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함 2015 년 10 월

조선대학교 산업기술융합대학원 융합자동차공학과 백 영 조





백영조의 석사학위논문을 인준함

2015 년 11월

조선대학교 산업기술융합대학원





목 차

LIST OF TABLES I
LIST OF FIGURES \blacksquare
ABSTRACT ····································
1. 서 론······1
1.1 연구배경 및 필요성······1
1.2 무차원 광소멸계수의 측정방법
2. 실험장치 및 측정방법
2.1 실험장치8
2.2 무차원 광소멸계수의 측정방법
3. 실험/수치해석 결과 및 고찰 16
3.1 n-heptane 입자상물질의 무차원 광소멸계수
3.2 저가형 매연입자 농도 측정장치의 성능평가
4. 결 론
【참고문헌】





LIST OF TABLES

Table 2.1	Chemical and Physical Properties of n-heptane
Table 3.1	Summary of measured Ke for n-heptane fuel
Table 3.2	Summary of calculated average OD and PM volume fraction
	for Case I and Case II



LIST OF FIGURES

Figure 2.1	Schematic diagram of an experimental-setup				
	for light extinction measurement9				
Figure 2.2	Schematics of transmission cell assembly 10				
Figure 2.3	Illustration of light extinction induced by PMs in the TC 10				
Figure 2.4	Flow rate variations with/without the MFC installed 11				
Figure 2.5	Measurements of mass of PM sampled on the filter 12				
Figure 2.6	Images of a laser and a photo-detector used to quantify				
	the light extinction constant of PM in the present study12				
Figure 2.7	Measured transmitted laser intensity ratio as a function				
	of time 13				
Figure 3.1	Measured PM volume fraction as a function of laser				
	transmittance 16				
Figure 3.2	Comparisons of dimensionless light extinction constant				
	for ethylene, acetylene and n-heptane fuels 17				
Figure 3.3	Light extinction (absorption and scattering)				
	induced by particles 18				
Figure 3.4	Variations in the light extinction constant with wavelengths $\cdot 20$				
Figure 3.5	TEM image of Diesel PM 20				
Figure 3.6	Experimental setup with low cost optical components				
	for PM measurements21				
Figure 3.7	Low-cost optical components used				
Figure 3.8	Calculated optical density (OD) variations with time 24				



ABSTRACT

An Experimental Study of the Performance Evaluation of an Optical Device for Measuring Smoke Concentrations

Young-Jo Baik

Advisor : Prof. Seul-Hyun Park, Ph.D. Department of Automotive Engineering Graduate School of Industrial Technology

The dimensionless extinction constant of particulate matter (PM) is one of the most important parameters that can be used for the concentration measurement of particles including smokes (PMs) released from automobiles. In this thesis, the dimensionless extinction constants, K_e of PMs produced from a small laminar flame burning n-heptane were measured at the atmospheric pressure of 0.1 MPa. A series of experiments were performed using visible light source of the wave length of 633 nm and 650 nm, respectively. Measurements were fulfilled with a Transmission Cell (TC) in which simultaneous gravimetric sampling and light extinction techniques were employed.

The measurements of the K_e value for n-heptane fuel was 10.0 ± 0.36 with the measurement uncertainty of 10.1 %. The measured K_e value for n-heptane fuel is significantly higher than the traditional value of K_e equal to 4.9 (usually cited from previous light extinction experiments) that is calculated using refractive index and the Rayleigh limit solution. The K_e value measured for n-heptance can be used for accurate measurement of volume fraction of PMs released from diesel engines.

In addition to the K_e measurement, the optical components consisting of light source and photo-receiver were characterized. To this end, standard optical components such as He-Ne laser (633nm) and photo-detector were replaced with a low-cost laser module and photo-sensor. The experimental results indicate that the optical density (OD)





measurements performed by low-cost optical components (i.e. laser module and photo-sensor) are very feasible, producing trackable variations in the OD values obtained from the set of standard optical components. Differences in the volume fraction calculated from the OD values with the measured Ke of 10.0 are attributed to the optical response characteristics of each light sensor.





제1장서 론

1.1 연구배경 및 필요성

화석연료의 사용이 급격히 증가한 산업혁명 이후 우리는 대기오염이라는 커다란 문제 에 직면하고 있다. 특히 대기오염은 각종 재해는 물론 지구온난화를 통해 이상 기후를 발생시켜 직·간접적으로 인류를 위협하고 있다. 이에 대응하여 세계 각국은 이상 기후의 원인인 대기오염을 방지하고자 노력하고 있다. 특히, 대기오염의 주요 배출원 중 하나로 지목되고 있는 자동차 배출물질에 대한 규제가 활발히 이루어지고 있다. 자동차로부터 배출되는 대표적인 유해물질로는 일산화탄소(CO), 탄화수소(THC), 질소산화물(NO_x), 입 자상물질(Particulate Matter, PM) 등을 들 수 있다.



Figure 1.1 Chemical composition of Heavy-Diesel PM [2]

특히 최근 들어 디젤자동차의 연소과정에서 발생하는 입자상물질 중 직경이 50mm 이하의 입자상물질이 대기오염 물질로서 주목을 받고 있다. 크기에 대한 분류에 의 해 직경이 2.5µm 이하를 Fine Particle, 100nm 이하를 Ultra Fine Particle, 그리고 50nm 이하의 입자를 Nano Particle (미세나노입자)로 규정하고 있다[1]. 그림 1.1에



서 볼 수 있는 바와 같이 이들 입자상물질은 주로 고체 탄소(elemental carbon, EC)로 이루어져 있으며, 다른 기타 성분들이 표면에 붙어있는 것으로 보고되고 있다 [2]. 현재의 입자상물질의 규제는 중량분포를 기준으로 하고 있지만 nm 크기의 입자 가 µm 크기의 입자에 비해 인체에 유해도가 크다는 사실이 보고되면서 부터 입자상 물질의 규제방식은 중량규제뿐만 아니라 수량규제도 병행되는 것이 합리적인 것으로 인식되고 있다. 특히 미세나노입자의 경우 인체에 미치는 영향은 중량이 적어도 입 자가 작으며 많고 인체의 세포에 침착성이 강한 물질이어서, 기도에 걸러지지 않고 바로 폐에 흡수되어 축적되고 혈관을 통해 전파될 수 있어 사람의 호흡 계 및 심장 계 질환의 원인(그림 1.2)이 되는 것으로 보고되고 있다[2,3].



Figure 1.2 Conceptual Diagram of the Epidemiological Evidence for the Association of BC with the Continuum of Cardiovascular Effects [2]



이와 같은 입자상물질의 유해성으로 인해 유럽연합(EU) 의회에서는 2014년부터 자동차 배출가스를 비롯한 입자상물질의 배출기준을 강화한 Euro 6[4]를 시행하고 있으며, 우리나라도 2016년부터 Euro 6 기준을 적용할 예정이다. 강화된 Euro 6에 서는 방식 입자상물질의 중량 규제뿐만 아니라 수량 규제도 병행하며, 그림 1.3에 제시된 바와 같이 2009년에 시행된 Euro 5 대비 입자상물질에 대해 80% 강화된 기준을 제시하고 있다[4].



Figure 1.3 Variations in the NO_{x} and PM regulations between Euro 1 and Euro 6 [4]

앞서 설명한 바와 같이 입자상물질의 주요 발생원으로 내연기관을 사용하는 자동 차를 예로 들 수 있으며, 그림 1.4에 도시되어 있는 바와 같이 미국의 경우 직경이 2.5µm인 입자상물질, 즉 PM2.5의 주요 발생원으로 자동차가 전체 발생 비중의 11.4%을 차지하는 것으로 조사되었으며, 특히 입자상물질의 주요 성분인 고체 탄소(EC)만을 고려 하면 전체 배출량 기준으로 절반 이상을 차지하는 것으로 보고되고 있다 [2]. 이와 같이 자동차 연소과정을 통해 배출되는 입자상물질이 증가함에 따라 이를 획기적으로 저감하





기 위하여 여과장치, 플라즈마 등 후처리와 관련된 많은 연구가 수행되고 있다 [5-7]. 이 과정에서 후처리 특성상 배출되는 입자의 측정과 그 과정에 대한 이해가 반드시 필요하 게 된다. 따라서 차량용 내연기관에서 배출되는 입자상물질의 측정과 결과의 해석은 입 자의 특성과 연관되어 이루어져야 한다.



U.S. PM_{2.5} Emissions in 2005 (5.5 Million Tons)





Figure 1.4 Contribution to Primary PM2.5 by Mega Source Categories [3]



자동차에서 배출되는 입자상물질(매연)의 체적분율(volume fraction)을 측정하는 방법 에는 필터를 이용하여 직접 샘플링 하는 중량분석법(gravimetric method)이 있다. 하지 만 측정과정의 번거로움으로 인해 입자에 의한 광소멸을 광학적 방법으로 측정하는 것이 일반적이다. 특히 이 경우 입자의 특성 중 광소멸계수를 정확히 알고 있어야만 정확한 체 적분율 측정이 가능하다. 하지만 광소멸계수는 연료에 따라 서로 다른 값을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며, 입자의 물리적 형상에 따라 광소멸계수가 달라질 수 있는 것으로 보고되고 있다[8]. 따라서 본 연구에서는 입자상물질의 정량적인 측정을 위하여 연소과정 을 통해 발생된 입자상물질의 광소멸계수를 측정하고, 이를 측정할 수 있는 광학장치에 성능에 관한 기초연구를 수행하고자 하였다.

1.2 연구목적 및 내용

앞서 기술한 바와 같이 배기가스의 일정 부피를 차지하고 있는 입자상물질(매연)의 실 제 질량은 중량분석법에 의하여 측정될 수 있다. 대부분의 규제 및 인증시험에서는 등적 채집 (constant volume sampling, CVS)기법과 입자상물질의 중량분석을 동시에 실시 하여 엔진에서 배출되는 입자상물질의 질량을 측정하게 된다. 하지만 이 경우, 배기가스 는 "희석터널(dilution tunnel)"이라고 하는 장치에서 일정한 양의 공기와 혼합되어야 하 며, 희석된 공기(dilution air)의 양 뿐만 아니라 필터를 통과하는 입자상 물질의 양 또 한 정확히 조정되어야만 시험이 진행되는 동안 배출된 입자상물질의 전체 질량(total mass)을 정확히 계산할 수 있다. 이러한 측정의 번거로움으로 인하여 입자상물질(매연) 의 광학특성(optical property)을 이용하는 간단한 장비들이 개발되어 정비소 또는 실차 (field)시험과 같은 시험실 이외의 장소에서도 배출 특성을 평가할 수 있게 되었다. 이러 한 장비는 "매연측정기(smoke meter)"라고 하며 일종의 입자로 인해 발생되는 불투명 도(opacity)를 측정하는 장치의 일종이다. 즉 매연측정기는 차량의 배기관(tailpipe)에 장 착되어 배출되는 배기가스에 포함되어 있는 입자에 의해 발생되는 빛의 감쇄 (light attenuation)를 측정하게 된다. 이 때 광투과도(opacity)는 일반적으로 백분율로 표시된 다. 0% 광투과도(opacity)는 깨끗한 공기, 그리고 100% 광투과도(opacity)는 무한대의 매연(infinite smoke)을 나타낸다. 한편, 일반적으로, 2% 이하의 광투과도(opacity)는 맨 눈(bare eye)에는 보이지 않는 상태를 의미하고, 5% 이상의 광투과도(opacity)가 되면 가시적인 매연 기둥(visible plumes of smoke)가 형성된다.

그림 1.5는 EpusT社 [8]의 광투과식 매연측정 장치(OP-16010)의 개략도이며 이 매연 측정기의 광투과도 측정 범위는 0~100%이다. 그림에 볼 수 있는 바와 같이 발광부에는 연초록 LED (563nm)가 적요되어 있으며 수광부는 포토다이오드를 사용하고 있다. 채취 된 배기가스는 측정실을 통과하는 동안발광부로부터 측정실의 수평 방향으로 반대편의 위치한 수광부로 빛을 조사하는데, 이 때 매연량에 따른 빛의 감소량을 수광부의 렌즈를 통해 집광시켜 포토다이오드에서 인지하여 매연입자에 의해 발생된 광투과도 값을 계산 하게 된다.



Figure 1.5 Schematics of a typical smoke meter, EpusT OP-16010 [8]

그림 1.5에 제시된 매연측정기를 사용하게 되면 간편하게 매연을 측정할 수 있지만, 광투과도의 정보를 통해 간접적으로 획득 가능한 정보는 농도가 높고 낮음의 정도이며 정량적인 매연농도 예측은 불가능하다. 앞서 기술한 바와 같이 광투과도의 정보를 바탕 으로 정량적인 매연농도를 예측하기 위해서 필요한 입자의 특성이 광소멸계수이며, 이 값은 입자의 굴절지수(refractive index)를 통해 계산할 수 있다. 하지만 연소과정을 통 해 발생된 입자의 경우 그 형상이 단순한 원형이 아니기 때문에 쉽게 계산할 수 없는 것 으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 1.5에 제시되어 있는 매연측정기와 유사 한 형태의 실험 장치를 구성하고 물리적·수학적 방법이 아닌 실험적인 방법을 통해 광소 멸계수를 측정하고자 하였으며, 아울러 매연측정 장치의 핵심 부품인 광학계(발광부/수 광부)의 성능이 저가형의 레이저 모듈과 광센서(photocell)의 조합을 통해 구현될 수 있



는 지를 평가해 보았다.

제시된 연구목적을 달성하기 위해 수행된 연구내용은 다음과 같다.

- ① 중력분석법을 적용하여 디젤유의 기준연료인 헵탄(n-heptane)의 연소과정에서 발 생하는 입자상물질의 농도측정
- ② 헵탄의 연소과정에 발생하는 입자상물질의 광투과율(광학밀도) 측정
- ③ 중력분석법으로 결정된 입자상물질의 농도측정 결과와 광학투과율(광학밀도) 측정결
 과의 상관관계로부터 무차원 광소멸계수 계산
- ④ 무차원 광소멸계수를 적용하여 입자상물질의 광학밀도로부터 입자 농도환산- 고가형 레이저/광검출기 vs 저가형 레이저 모듈/광센서의 성능 비교





제 2 장 실험장치 및 측정방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 입자상물질(Particulate Matter, PM)을 발생시키기 사용된 연료는 디젤 연료의 기준연료(Reference Fuel)로 알려진 순도 99.9% 이상의 n-heptane이며, 그 물 성치는 Table 1에 정리되어 있다. n-heptane 확산화염(diffusion flame)은 표준 연소조 건(25℃, 101.3 kPa)에서 공기-연료비(A/F ratio)조건에 따라 다량의 입자상 물질을 생성 하는 것으로 보고되고 있다 [9, 10].

Table 1. Chemical and Physical Properties of n-heptane

Density	Chemical Formula	Boiling Point	Molar Mass
684.00 kg/m ³	C ₇ H ₁₆	98.42 °C	100.21 g/mol

그림 2.1는 n-heptane 연료의 연소과정에서 발생된 입자상물질의 무차원 광소멸계수 를 측정을 위해 본 연구를 통해서 제작된 실험장치의 개략도이다. 매연입자인 입자상물질 은 Wick버너의 연소과정에서 생성되며, Wick버너 화염 끝단으로부터 방출되는 입자상물 질은 공기와 혼합되어 Transmission Cell (TC) 안쪽으로 유입된다. 확산화염으로부터 생 성되는 입자상물질의 양은 Wick버너의 심지 높이를 조절함으로써 증발되는 연료량을 제 어하는 방식으로 조절하였다.

그림 2.2에 제시된 것처럼 TC는 0.8 m × 0.08 m × 0.08 mm의 직육면체의 형태로 알 루미늄으로 제작되었으며 내부에는 무광 흑색 페인트로 도포하여 표면에 의한 빛의 반사 나 산란을 억제할 수 있도록 하였다. 생성된 입자상물질은 TC에 유입되어 TC의 양 끝면 에 설치된 광학 창을 통해 투과하는 레이저 광원(633 nm)에 노출되게 된다. 입자상물질 은 TC를 통과하는 동안 파장이 633nm인 광원에 노출되어, 그림 2.3에서처럼 입사되는 광을 흡수하거나 산란하게 된다. 이 때 입자상물질에 의해 산란되는 광의 강도는 TC 측 면의 정 중앙에 설치된 광전증폭관(Photomultiplier Tube, PMT)로 측정할 수 있다.







Figure 2.1 Schematic diagram of an experimental-setup for light extinction measurements







Figure 2.2 Schematics of transmission cell assembly



Figure 2.3 Illustration of light extinction induced by PMs in the $\ensuremath{\mathsf{TC}}$



TC의 하류 쪽에는 진공펌프(vacuum pump)가 설치되어 공기와 혼합된 입자상물질이 TC 안쪽으로 유입시킬 수 있도록 TC의 상류의 입구와 하류 출구 사이에 압력 차를 발 생시킨다. 또한 TC 하류 선단에는 입자상물질의 채집 장치가 설치되어 있으며, 채집 장 치에는 기공(Pore)크기가 0.7 µm인 유리섬유 필터가 장착되어 공기와 입자상물질이 혼합 된 유동으로 입자상물질만을 추출하도록 설계되어 있다. 이 때 입자상물질의 축적으로 발 생될 수 있는 필터 양단의 압력 차를 보상하기 위해 필터 후단에는 질량유량계(mass flow meter, MFC)를 설치하였다. 그림 2.4에서 볼 수 있는 것처럼 질량유량계에 설치된 경우 그렇지 않은 경우와 달리 유량센서로 측정한 유량이 일정하게 유지되고 있음을 확 인할 수 있다.



Figure 2.4 Flow rate variations with/without the MFC installed

채집 실험은 충분한 양의 입자상물질이 필터에 채집될 수 있도록 실험 조건에 따라 약 5분 동안 지속하였으며, 필터에 채집된 입자상물질의 질량은 정밀저울을 이용하여 측정 하였다. 입자상물질의 질량은 입자상 물질의 채집 실험 전 필터의 무게를 측정하고, 채 집 실험을 마친 후 필터의 무게를 각각 측정하여 각 필터 무게의 차를 이용하여 측정하 였고 측정 전과 측정 후의 필터의 비교 사진은 그림 2.5에 제시되어 있다.







(a) before sampling (b) after sampling Figure 2.5 Measurements of mass of PM sampled on the filter

입자상물질의 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해 본 연구에서 사용된 방법은 광학적 방법에 의해 측정된 입자상물질의 체적분율(volume fraction)과 필터로 채집된 입자상 물질의 체적분율의 상관관계로부터 역산하는 방식이다. 입자상물질의 무차원 광소멸계수 를 측정하기 위해서 사용된 광원은 비교적 고가인 레이저로 파장이 633 nm이다. 앞서 기술 한 것처럼 TC를 투과하는 레이저 광의 강도는 연기입자의 광흡수와 광산란으로 인 하여 광소멸을 일으키게 된다. 광소멸로 줄어든 광원의 크기를 측정하기 위해 광원 파장 대역의 강도를 검출할 수 있는 광검출기를 설치하였으며 레이저와 마찬가지로 비교적 고 가인 제품이다 (그림 2.6).



Figure 2.6 Images of a laser and a photo-detector used to quantify the light extinction constant of PM in the present study



2.2 무차원 광소멸계수의 측정 방법

그림 2.7은 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 광원의 입사강도 (L₀)를 광검출기로 측정한 뒤 입자상물질이 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광 원의 강도(I)를 측정하여 계산한 광투과율(I/L₀)을 도시한 것이다. 그림에 제시되어 있는 바 와 같이 입자상물질과 혼합된 공기가 TC에 유입되기 전과 공급이 중단된 뒤의 광투과율 (I/L₀)은 항상 일정하였다. 즉, 입자상물질이 TC에 유입되기 전과 후의 광투과율이 일정하 였으므로 TC에 잔류하는 입자상물질은 없다고 가정할 수 있다. 또한 그림에서 확인 할 수 있는 것처럼 입자상물질의 채집구간에서 (레이저와 평행선상에 있는 광검출기를 이용 하여) 측정한 광원의 크기변화가 없었으므로 광원의 안정성(stability)을 확보였다고 할 수 있다. 입자상물질과 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입이 시작된 직후부터 광투과율은 급 격히 감소하여 곧 준정상상태(qusai-steady state)에 도달하였다.



Figure 2.7 Measured transmitted laser intensity ratio as a function of time

광투과율이 준정상상태에 도달한 직후부터 TC하류에 설치된 채집장치의 필터를 통해 입자상물질을 채집하기 시작하였고 이때 준정상상태에 도달한 평균 광투과율(I/I_o)은 Bouguer 법칙에 의해 식(2.1)로 나타낼 수 있다 [11].





$$\frac{I}{I_o} = \exp\left(-K_e \frac{f_v}{\lambda}L\right) \tag{2.1}$$

식(2.1)에서 각각 K_e는 무차원 광소멸계수, *f_v*는 광학적으로 측정된 입자상물질의 체적분 율, λ는 광원의 파장 길이, *L*은 레이저의 경로길이를 의미한다. 한편, 필터로 측정한 입 자상물질의 체적분율, *f_{vg}*는 식(2.2)을 이용하여 계산할 수 있다 [11].

$$f_{vg} = \frac{m}{Vt\rho} \tag{2.2}$$

식(2)에서 m은 필터에 채집된 입자상물질의 질량, V는 TC에 유입된 공기의 유량, t는 채 집시간, p는 입자상물질의 밀도이다. 대략 6분 정도의 채집시간동안 필터에 채집된 입자 상물질의 질량을 정밀저울을 이용하여 측정하였으며, 입자상물질의 밀도는 연료와 상관없 이 널리 사용되는 soot입자의 밀도값 (1.7 g/cm³)을 적용하였다[12]. 식(2)에 의해 계산 된 체적분율, f_{vg}는 필터로 채집한 입자상물질과 동일한 시간대에 측정하였으므로 식(1)의 광투과율(I/I_o) 평균값을 이용하여 계산한 체적분율, f_v와 같아야 하고 이 관계를 적용하면 식(2.3)로 표현할 수 있다.

$$f_v = f_{vg} = -\frac{\lambda \ln\left(\frac{I}{I_o}\right)}{LK_e}$$
(2.3)

결국, 무차원 광소멸계수, Ke는 식(2.4)을 통해 최종 계산할 수 있다 [11-13].

$$K_e = -\frac{Vt\rho\lambda\ln\left(\frac{I}{I_o}\right)}{Lm}$$
(2.4)

식(2.4)에 의해 계산된 무차원 광소멸계수 측정 불확도는 식(4)에 포함되어 있는 각 측 정 인자의 계측 시 사용된 계측기의 최대 측정 오차범위와 문헌에 제시되어 있는 연기입 자 밀도의 측정 오차범위(±0.1 g/cm³)를 적용하여 식(2.5)를 통해 계산하였으며, 계산 된 측정 불확도는 ± 10.1 % 이다.





$$\frac{\delta K_e}{K_e} = \sqrt{\sum_n \left(\frac{S_n}{K_e} \frac{\partial K_e}{\partial S_n} \frac{\delta S_n}{S_n}\right)^2}$$
(2.5)

식(2.5)에서 δK_e 는 무차원 광소멸계수의 측정 불확도, S_n 은 식(2.3)에 제시된 각각(n=6 개)의 측정 인자, δS_n 는 각 측정인자의 최대 측정오차를 의미한다.





제 3 장 실험결과 및 고찰

3.1 n-heptane 입자상물질의 무차원 광소멸계수

그림 3.1 에는 필터에 채집된 연기입자의 질량과 채집시간 동안 얻어진 ln(I/I_o) 평균 값과의 상관관계가 도시되어있다. 그림에서 보이는 바와 같이 TC안쪽으로 유입된 연기 입자의 양이 0.03 ppm에서 0.09 ppm으로 증가함에 따라 -ln(I/I_o) 평균값이 0.5 (optically-thin)에서 1.7 (optically-thick)사이에서 선형적으로 변화하고 있음을 보여주 고 있다. 이 결과는 필터에 채집된 입자상물질의 체적분율과 광학적으로 측정하게 될 체 적분율이 서로 선형적 상관관계가 있음을 의미하며 식(2.3)에 적용된 가정($f_v=f_{vg}$)의 타당 성을 뒷받침하는 결과이다.



Figure 3.1 Measured PM volume fraction as a function of laser transmittance

표 3.1에는 그림 2.6에서 사용된 광투과율(-ln(I/I_o)에서 측정된 무차원 광소멸계수의 결과를 정리한 결과이다. 측정된 n-heptane 연료 입자상물질의 무차원 광소멸계수(K_e) 의 평균은 10.00 ± 0.38 이며, 이 값은 그림 3.2에서 비교되어 있는 바와 같이 Ethylene





과 Acetylene 연료로부터 발생된 입자상물질의 무차원 광소멸계수[14]와 측정 불확도 범 위 내에서 서로 유사하다.

-ln(I/I _o)	K _e
0.50	10.1
0.71	10.5
1.10	9.9
1.70	9.6

Table 3.1 Summary of measured Ke for n-heptane fuel



Figure 3.2 Comparisons of dimensionless light extinction constant for ethylene[14], acetylene[14] and n-heptane fuels

입자에 의한 광소멸은 그림 3.3에서 볼 수 있는 바와 같이 입사광의 크기가 입자의 다 양한 형상과 화학적 특성에 의하여 산란되고 흡수되어 줄어드는 현상으로 입자의 굴절지





수 (refractive index)에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다[15].



Figure 3.3 Light extinction (absorption and scattering) induced by particles

이와 같은 광소멸 현상은 무차원 광소멸계수(K_e)를 통해 광산란계수(K_s)와 광흡수계수(K_a)의 합으로 표현할 수 있다.

$$K_a = 6\pi E(m) \tag{3.1}$$

$$K_{s} = 4\pi x_{p}^{3} k_{f} F(m) \left(\frac{3D_{f}}{16x_{p}^{2}}\right)^{\frac{D_{f}}{2}}$$
(3.2)

여기서, m은 입자상물질의 굴절지수 (m=n-ik)이고, x_p 는 입자의 직경, d_p 와 파장, λ 사 이의 관계를 정의한 광학직경($\pi d_p/\lambda$)이며, k_f ,와 D_f 는 각각 fractal prefactor, fractal





dimension을 의미한다. 또한 식(3.1)와 (3.2)에서 E(m)과 F(m)의 다음과 같이 정의 할 수 있다 [14, 15].

$$E(m) = Im\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right)$$
(3.3)

$$F(m) = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \tag{3.4}$$

결국, 식 (3.1)에서 식 (3.4)를 통해 알 수 있는 것처럼, 입자상물질에 의한 광소멸 현 상은 굴절지수이외에도 광원의 파장, 입자의 형상(*x_p*,*k_f*, *D_f*)에 의해 큰 영향을 받을 수 있다.

하지만, 연소 분야나 자동차 분야에서 일반적으로 광소멸법을 이용하여 입자상물질의 체적분율을 측정하는 경우 무차원 광소멸계수는 Rayleigh limit 해법식 식(3.5)을 이용하여 계산하게 된다.

$$K_e = \frac{36\pi nk}{(n^2 - k^2 + 2) + 4n^2k^2}$$
(3.5)

식(3.6)에서 n와 k는 입자상물질의 굴절지수(m=n-ik)의 실수와 허수를 각각 의미하며, 이 때 입자상물질의 무차원 광소멸계수를 계산하기 위해서 자주 인용되는 굴절지수는 1.68-i0.56이다. 이 굴절지수를 식 (3.5)에 적용하여 본 연구에서 사용된 레이저 광원의 파장에서 계산된 K_e값 (≒4.5)은 (본 연구에서) 실험적으로 얻어진 값 (=10.0)에 비해 훨 씬 적은 값이다. 앞서 기술한 것처럼 K_e는 광원 파장에도 큰 영향을 받으며 그림 3.4는 광원의 파장별로 변하는 K_e를 도시한 그래프이다. 그림에서도 본 연구에 적용된 광원의 파장. 633 nm에서 계산된 K_e는 실험적으로 측정된 값에 비해서 훨씬 작은 결과를 보여 준다. 결국 본 연구에서 얻어진 K_e값을 적용하여 디젤이나 n-heptane 입자상물질의 체 적분율를 계산할 경우, Rayleigh limit 해법식으로 얻어진 K_e값을 이용하는 경우에 비해 훨씬 작아질 수 있음을 의미한다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 연기입자에 의한 광소멸 은 광흡수와 광산란를 모두 고려한 것이지만, Rayleigh limit 해법에서는 입자에 의한 광흡수만을 고려하여 계산하게 되므로 본 실험을 통해 측정된 값과는 차이가 있으며, 이 는 곧 입자상물질에 의한 광산란의 비중을 무시할 수 없다는 것을 의미한다.







Figure 3.4 variations in the light extinction constant with wavelengths [16,17]

입자에 의한 광산란의 경우 식 (3.2)를 통해 언급한 것처럼 광원의 파장이외에도 입자 의 형상에 의해 영향을 받으며, 실제 입자상물질의 광투과현미경(transmission electron microscope, TEM) 이미지 (그림 3.5)를 살펴보면 입자의 형상이 단순 원형이 아닌 다수의 원형입자들이 뭉쳐 형성된 덩어리(agglomerate) 모양을 띠고 있다.



Figure 3.5 TEM image of Diesel PM

- 20 -



통상 입자상물질의 덩어리의 회전반경(radius of gyration)은 광원 파장과 유사하거나 크기 때문에 입자로부터의 광산란 효과를 무시할 수 없는 것으로 보고되고 있다. 따라서 입자상물질이나 내/외연기관으로부터 배출되는 매연입자의 농도를 측정하고 할 때 무차 원 광소멸계수의 선택은 신중하게 결정할 필요가 있으며 식 (3.5)을 이용하여 계산한 무 차원 광소멸계수는 입자의 형상과 다양한 정보를 바탕으로 한정적으로 사용해야만 한다.

3.2 저가형 광학계를 이용한 매연입자 농도측정

대기 중으로 방출되는 입자상물질의 원천으로 각종 내연기관이 손꼽히고 있으며 그 중 에서도 디젤 자동차로부터 대기 중으로 배출되는 매연입자로 인한 입자상물질은 서론에 서 언급한 것처럼 배출량 뿐 만이라 그 크기도 관련 법규로 엄격히 제한되고 있다. 앞 절에서 기술한 것처럼, 디젤 자동차로 배출되는 매연입자의 농도는 주로 스모크미터를 이용하여 측정하고 있으며 본 연구를 통해 제작된 실험 장치와 유사하게 구성되어 있다. 이 절에서는 스모크미터와 본 연구에서 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해 적용된 비교 적 고가의 레이저와 광검출기를 대신해 저가형 레이저 모듈과 광센서의 조합을 사용하여 매연입자의 농도를 측정할 수 있는가에 대해 기술하였다.

그림 3.6은 저가형 레이저와 광센서를 적용하여 입자상물질(매연)의 농도를 측정하기 위해 구성한 광학계의 개략도이다.



Figure 3.6 Experimental setup with low cost optical components for PM measurements



그림에서 볼 수 있는 바와 같이 저가형 레이저와 광센서 이외에 그림 2.1에 사용된 고 가형 레이저와 광검출기도 함께 설치하여 동일한 실험 조건에서 TC에 유입된 입자상물 질(매연)의 농도를 3.1절에 제시된 무차원 광소멸계수(10.0)를 이용하여 계산하고 상호 비교해 보았다. 그림 3.7은 저가형 매연입자 농도 측정 장치를 구성하기 위해 적용된 레 이저 모듈과 광센서의 이미지이다.





(a) Laser module (LB650)

(b) Photo Cell (TSL12S)

Figure 3.7 Low-cost optical components used

일반적으로 사용되는 매연입자 농도 측정 장치인 광학식 스모크미터의 경우 정량적인 매연입자의 농도를 제공할 수 없으며 식(3.6)에 제시된 광학밀도(optical density)를 이용 하여 매연입자의 농도가 높고 낮음만을 상대적으로 표시하게 된다.

$$OD = -\frac{1}{L} ln(\frac{I}{I_o}) [m^{-1}]$$
(3.6)

하지만 식 (3.6)과 식 (2.3)은 식 (3.7)과 같은 상관관계가 성립하므로 3.1절에서 구한 (매연입자의) 무차원 광소멸계수와 광원의 파장을 알게 되면 매연입자의 농도를 계산할 수 있다.

$$OD \times \frac{\lambda}{K_e} = -\frac{\lambda \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{LK_e} \tag{3.7}$$







Figure 3.8 Calculated optical density (OD) variations with time

그림 3.8은 약 5분 동안 TC에 유입된 매연입자(입자상물질)의 광학밀도의 변화를 나타 내는 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 매연입자가 입자가 TC안으로 유입됨 에 따라 광투과율은 급격히 감소하게 되지만 광학밀도는 급격히 증가하여 곧 준정상상태 에 도달하게 된다. Case I에 비해 Case II의 경우 TC로 유입되는 매연입자가 증가하게 되고 광학밀도도 역시 높은 것을 볼 수 있다. 고가형 레이저와 광검출기로 계산된 광학밀 도 값과 저가형 레이저와 광센서로 계산된 광학밀도 값에는 약간의 차이가 있기는 하지만 광학밀도의 변화의 추세는 두 Case모두 동일하게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 표 3.2에는 그림 3.8에 제시된 두 Case에 대해 준정상상태에 도달한 광학밀도 값의 평균을 이용하여 계산한 입자상 물질의 체적분율을 정리해 두었다.

Table	3.2	Summary	of	calculated	average	OD	and	ΡМ	volume	fraction
		for Case I	ar	nd Case II						

	Device	Average OD [m ⁻¹]	Volume fraction [ppm]
Case I	Low cost device	0.49	0.038
	Std. device	0.47	0.036
Case II	Low cost device	0.68	0.053
	Std. device	0.64	0.049

표 3.2에 제시되어 있는 바와 같이 두 Case 간에 평균 광학밀도 값이 증가함에 따라 고가형 장치와 저가형 장치에서 계산된 체적분율의 차이가 다소 증가함을 확인할 수 있 다.



Figure 3.9 Light attenuation by absorptive neutral density filters

- 24 -

식(3.6)을 통해 알 수 있는 바와 같이 상수로 취급되는 *L*과는 다르게 레이저 출력안정 성과 광검출기의 작동특성에 따라 영향 받는 광투과율(I/I_o)의 측정결과는 광학밀도 계산 에 쉽게 영향을 줄 수 있으므로 주의 깊게 측정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 3.9에 제시된 흡수식 중성(neutral density, ND)필터를 이용하여 인위적인 광소멸 을 생성시키고 식(3.8)을 이용하여 실험 전 레이저/광검출기와 레이저모듈/광센서 조합 의 성능을 검증하였고 그 결과를 그림 3.10에 도시하였다.

$$\frac{I}{I_o} = 10^{-ND}$$
(3.8)

식(3.8)에서 ND는 흡수식 중성필터 값이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, ND값이 큰 필터를 사용하여 레이저 입사광을 흡수함에 따라 광투과율이 급격히 감소하고 있으며, 식(3.8)로 계산된 이론값과 광검출기 및 광센서를 이용하여 각각 측정된 광투과율이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



Figure 3.10 Comparisons of calculated and measured light transmittance ratios





(a) Responsibility of standard photodetector



(a) Responsibility of low-cost photocell

Figure 3.11 Responsibility of photo detector/sensor as a function of wavelength



결국, 광학밀도가 증가할수록 계산된 체적분율의 차이가 증가하는 현상은 고가형 레이 저-광검출기와 저가형 레이저-광센서 간의 상이한 응답성에 기인한 것으로 추측해 볼 수 있다. 광검출기 및 광센서의 응답성은 단위입력 광원의 강도(watt)당 전류(전압)의 출력특 성으로 나타낼 수 있으며, 실험에 사용된 광검출기와 광센서의 응답성을 광원의 파장의 함수로 그림 3.11에 나타내었다. 그림에 도시되어 있는 바와 같이 고가형 광검출기의 경 우 대략 파장이 근적외선 근처인 1000 nm 영역에서 가장 강한 응답성을 나타내지만 이 에 반해 저가형 광센서는 가시광선 영역인 대략 760 nm에서 가장 강한 응답성을 나타낸 다. 본 연구에서 광원으로 사용된 레이저 및 레이저 모듈의 파장이 633~650 nm이기 때 문에 오히려 저가형의 광센서가 입사광의 크기변화에 민감하게 반응할 수 있고, TC로의 매연물질의 유입이 증가함에 따라 광투과율(I/I₀)의 크기가 더 낮아질 수 있다. 이 결과, 고가형 광검출기에 비해 저가형 광센서를 통해 측정된 광학밀도가 높게 측정되고 계산된 체적분율의 차이로 나타나게 된다. 이 같은 차이는 광원의 파장대역에 상응하는 대역폭필 터(bandwith filter)의 적용이나 응답성 특성이 유사한 센서를 사용함으로써 개선될 수 있을 것으로 판단된다.





제 4 장 결 론

본 연구에서는 가솔린 기관에 비해 디젤 기관에서 배출되는 입자상물질, 즉 매연입자 가 더 많은 것을 감안하여 디젤의 기준연료인 n-heptane 층류확산화염을 통해 매연입 자(입자상물질)를 발생시키고 TC로 유입시켜 무차원 광소멸계수를 측정하였다. TC에 유 입된 입자상물질을 중력식 필터법 으로 체적분율을 측정한 뒤 광학적인 방법으로 측정한 체적분율과 비교하여 무차원 광소멸계수를 계산하였다. 계산된 n-heptane 매연입자(입 자상물질)의 무차원 광소멸계수는 10.0±0.38로 Rayleigh limit 해법 식으로 계산된 탄화 수소계 연료의 무차원 광소멸계수에 비해 훨씬 큰 값이지만, 실험적으로 측정된 매연입 자(입자상물질)의 무차원 광소멸계수와는 측정 불확도 범위 내에서 유사하였다.

아울러 기존의 광학식 매연입자 측정기인 스모크미터의 핵심 부품인 광원 및 수광부를 저가형으로 제작해 보고자 관련 기초연구를 수행하였다. 통상 매연입자의 농도에 상응하 는 광학밀도 값만 제시해 주는 스모크미터의 한계를 넘어 정량적으로 매연입자의 체적분 율을 계산할 수 있도록 본 연구에서 측정된 매연입자(입자상 물질)의 무차원 광소멸계수 (10.0±0.38)를 적용하였고, TC에 장착되어 있는 고가의 광학 부품(레이저 및 광검출기) 에 저가형 레이저 모듈과 광센서를 추가 설치하여 그 성능을 비교·분석해 보았다.

저가형으로 교체한 광학계를 통해 측정된 광학밀도의 변화도 고가형 레이저와 광검출 기를 통해 측정된 변화와 동일한 경향을 나타내었다. 다만 고가형 광검출기를 통해 측정 된 광학밀도와 입자상물질의 무차원 광소멸계수를 적용하여 계산한 입자의 체적분율이 저가형 광학 부품을 이용한 경우에 다소 낮게 나타났다. 이는 고가형 광검출기는 근적외 선 영역인 약 1000 nm에서 최고의 응답성을 보이는 반면 저가형 광센서는 가시광선 영 역인 약 760 nm에서 최적의 응답성을 보이기 때문이다. 즉, 실험에 사용된 광투과율의 측정은 633~650 nm의 파장대역에 측정되었으며, 광센서의 응답성이 주어진 파장대역에 서 다소 우수하기 때문에 광투과율이 낮아질수록 체적분율이 증가하는 것으로 판단된다. 하지만, 저가형 레이저 모듈과 광센서로 구성된 광학부품도 매연농도 측정에 신뢰할 수 있을 만한 성능을 보여줌을 확인할 수 있었다. 매연입자의 정량적인 측정의 차이는 광원 의 파장대역에 상응하는 대역폭필터의 적용이나 응답성 특성이 유사한 센서를 사용함으 로써 개선될 수 있을 것으로 판단된다.





참 고 문 헌

- [1] 이천환 외 10명 "EUOR-4 대응 상용디젤엔진의 SCR 시스템 적용에 따른 나 노입자 배출특성", 한국자동차 공학회 춘계학술대회 논문집, pp274~279, 2007.
- [2] 김덕줄, 김병철, 김세웅 외 "내연기관공학", 도서출판 교보문고, 2005.
- [3] Sasser, E. et al. "Report to Congress on Black Carbon", United Sates Environmental Protection Agency (EPA), 2012.
- [4] 최요한, 김선욱, 국제환경규제기업지원세터 분석보고서, BSC Report 359-13-103
 EU, "EURO 6 자동차 배출가스 규제 시행"
- [5] 김학준, 한방우, 김용진, "정전 방식 지젤 PM 포집 장치 성능 및 엔진 적용성 평가",
 한국자동차공학회논문집 (2008) Vol 19(6), pp. 176-183.
- [6] 이천환, 조택동, "상용디젤엔진의 EURO_IV 배기규제 재응을 위한 Urea-SCR시스템
 의 나노입자 배출특성에 관한 실험적 연구". 한국자동차공학회논문집 (2007) Vol 15(6), pp. 128-136.
- [7] 이진하, "승용 디젤자동차의 후처리 시스템 적용 기술" 한국자동차공학회 오토저널(2013) Vol 35(9), pp. 22-26.
- [8] 강일호, 이충훈, "광투과식 매연 측정법을 이용한 소형 디젤 차량의 무부하 급가속 조건에서의 매연 배출 특성", 한국안전학회지 (2012) Vol 27(3), pp 1-8.
- [9] Tao, F, Reitz, R.D., and Foster, D.E.," Revisit of Diesel Reference Fuel (n-Heptane) Mechanism Applied to Multidimensional Diesel Ignition and Combustion Simulations", 17th International Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress, April 15, 2007,





Detroit, Michigan

- [10] Xu, Z., Zhao, Z., Li, J., Wang, M. et al "A Reduced Chemical Kinetic Mechanism of Toluene Reference Fuel (toluene/n-heptane) for Diesel Engine Combustion Simulations," SAE Technical Paper 2015-01-0387
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Zhu, J. Y., (2002) An Experimental Invesitigaton of Soot Optical Properties in the Visible and Infrared Spectrums, Ph.D thesis, University of Illinois at Chicago
- [15] Williams, T. C., Shaddix, C. R., Jensen, K. A., Suo-Anttila, J. M. (2007) Measurement of the dimensionless extinction coefficient of soot within laminar diffusion flames, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50, pp. 1616
- [16] Lee, S. C., and Tien, C. L. (1981) Optical constants of soot in hydro-carbon fames, *Proc. Combust. Inst.* 18, 1159





[17] Habib, Z.G. and Vervisch, P. (1988) On the refractive index of soot at temperature, *Combust. Sci. and Tech.*, 59, 261

