



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월  
석사학위 논문

# 확산 화염 내 생성된 그을음 입자의 농도 측정에 관한 연구

조선대학교 산업기술융합대학원

융합자동차공학과

류 명 호

# 확산 화염 내 생성된 그을음 입자의 농도 측정에 관한 연구

A Study of the Concentration Measurements of Soot Particles  
formed within Diffusion Flames

2017 년 2 월 일

조선대학교 산업융합기술대학원

융합자동차공학과

류 명 호

# 확산 화염 내 생성된 그을음 입자의 농도 측정에 관한 연구

지도교수 박 설 현

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2016 년 10 월

조선대학교 산업기술융합대학원

융합자동차공학과

류 명 호

## 류명호의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조 홍 현 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 지 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 박 설 현 (인)

2016 년 11월

조선대학교 산업기술융합대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
ABSTRACT .....	III
<b>1. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구배경 및 필요성 .....	1
1.2 연구 목적 및 내용 .....	4
<b>2. 실험장치 및 방법</b> .....	<b>7</b>
2.1 액적 확산화염 내 그을음 농도 측정 실험 장치 및 방법 .....	7
2.2 그을음 입자의 무차원 광소멸계수 측정 실험 장치 및 방법 ..	12
<b>3. 실험결과 및 고찰</b> .....	<b>15</b>
3.1 액적 확산화염 내 그을음 가시화 .....	15
3.2 그을음의 무차원 광소멸계수 측정 결과 .....	18
3.3 액적 확산화염 내 그을음 농도 계산 결과 .....	23
<b>4. 결 론</b> .....	<b>28</b>
<b>【참고문헌】</b> .....	<b>29</b>

## LIST OF TABLES

Table 1.1	Emission gas regulations imposed by euro-6	1
Table 1.2	Diesel engine exhaust gas components	2
Table 3.1	Summary of measured Ke for Kerosene fuel	22

## LIST OF FIGURES

Figure 1.1	Illustration of secondary PM formation process	2
Figure 1.2	Major source for PM emissions in Korea	3
Figure 1.3	Schematics of a typical smoke meter, EpusT OP-16010	4
Figure 1.4	Schematic of soot particles formed in a diffusion flame	5
Figure 2.1	Schematic diagram of an experimental setup for measuring the concentration of soot particles	7
Figure 2.2	Optical configuration for a full field light extinction apparatus	8
Figure 2.3	Spectral characteristics of a 635nm laser diode	9
Figure 2.4	Beam expansion using Keplerian optic method	10
Figure 2.5	Schematic diagram of an experimental-setup for measuring the dimensionless light extinction constant of soot particles	12
Figure 2.6	Schematics of light extinction by soot particles inside the transmission cell (TC)	13
Figure 3.1	Full field laser extinction image of burning liquid droplet fuel	15
Figure 3.2	Calculation process for the laser transmittance using a digital image processing technique	16
Figure 3.3	Measured laser transmittance through the flame	17
Figure 3.4	Schematics of light-of sight projection distribution	18
Figure 3.5	Light extinction (absorption and scattering) induced by particles	19
Figure 3.6	Measured transmitted laser intensity ratio as a function of time	20
Figure 3.7	Measured soot concentration as a function of laser transmittance	21
Figure 3.8	Calculated projected profile with the measured $K_e$	23
Figure 3.9	Calculated concentration distribution for soot particles within the flame	26
Figure 3.10	Variations in soot distribution and concentration affected by Abel inversion	27



## ABSTRACT

### A Study of the Concentration Measurements of Soot Particles formed within Diffusion Flames

Myung-Ho Ryu

Advisor : Prof. Seul-Hyun Park, Ph.D.

Department of Automotive Engineering

Graduate School of Industrial Technology

In the present study, non-intrusive technique for the concentration measurements of soot particles formed within the flames was experimentally investigated. In the previous investigations, the light extinction technique has been widely used to measure the concentration of soot particles produced from the combustion process since its optical system consists of less expensive optical components and can be easily configured compared to other non-intrusive optical measurement systems. Although the light extinction technique is one of the most common measurement methods for soot particle concentration due to its ease of use and cost competitiveness, there exists some disadvantages that should be overcome. For example, only the concentration of soot particles which is integrated along the line path of light source can be calculated using the conventional light extinction technique.

The local concentration and distribution of soot particles formed within the flame (that can not be obtained from the conventional light extinction technique) are factors for a qualitative flame analysis (that can influence the flame temperature through radiative heat transfer process and thus the flame extinction). To overcome such disadvantages of the conventional light extinction method, the full field light extinction apparatus (that enables us to obtain the spatial distribution and local concentration of soot particle within the flames) was developed and implemented as part of this study. The 3 point Abel inversion

algorithm was also coded using a Fortran software to recover the spatial distribution and concentration of soot particles from the projected values obtained from the CCD camera.

The dimensionless extinction constant of soot particle is a critical parameter that is inevitably needed to the concentration measurement of particles. In this thesis, the dimensionless extinction constant of soot particles produced from a small laminar flame burning kerosene was measured at the wave length of 635 nm. Measurements were fulfilled with a Transmission Cell (TC) in which simultaneous gravimetric sampling and light extinction techniques were employed. The measured dimensionless extinction constant for kerosene fuel was  $11.3 \pm 0.3$ . To obtain the local concentration and distribution of soot particles formed within the flame, laser-backlit images produced with a 635 nm light source were captured using a CCD camera built in the full field light extinction apparatus and digitized. From digitized laser-backlit images, projected values along the path line were determined and deconvoluted using a 3 point abel inversion technique. The abel inversion analysis clearly indicates that the spatial distribution of soot particles within the flame can be faithfully reconstructed from the projected light extinction image captured by a CCD camera.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 필요성

자동차 연소과정에서 배출되는 배기가스는 급성장하는 자동차 보급률에 비례하여 그 비중이 증가하고 있으며 대기환경의 오염원 중에서 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 특히 연료 소비율이 높고 연소 효율이 높다는 이유로 전 세계적으로 보급률이 증가 추세에 있는 디젤 자동차에서 배출되는 배기가스에 대한 규제가 엄격해지고 있다. Table 1.1 에 정리되어 있는 바와 같이 2016년 9월부터 국내에 적용된 승용 디젤 엔진 차량의 EURO-6 질소산화물(Nitrogen oxide, NOx) 규제치는 EURO-5 대비 약 56% 강화된 0.08g/km 이며, 입자상 물질(Particulate Matter, PM)의 규제치는 0.0045g/km이다 [1].

Table 1.1 Emission gas regulations imposed by Euro-6 [1]

Emission gas	EURO-6
NOx	0.0800g/km
PM	0.0045g/km

디젤자동차의 연소 과정 중 배출되는 배기가스는 크게 미세먼지인 입자상 물질과 가스상 물질로 구분되며 Table 1.2에 정리되어 있는 바와 같이 입자상 물질은 고체(dry carbon)와 액체(윤활유, 미연소 연료)등으로 이루어지며 가스상 물질은 질소산화물(NOx) 탄화수소(THC) 일산화탄소(CO)등으로 구성된다[2]. 이중 디젤엔진의 주요 오염물질은 질소산화물(NOx)과 입자상물질(PM)이며 특히 미세먼지라고 명칭 되는 입자상 물질(PM)은 아주 작은 미세 입자이면서 발암성 물질을 함유하므로 그 유해성이 크다고 알려져 있다. 이로 인해 최근 사회적인 이슈가 되고 있는 미세먼지에 대한 정량적인 농도측정에 대해 사회적인 관심이 높아지고 있으며 이에 대응하여 정부에서는 전국에 300여개 측정소에서 측정되어 “실시간대기오염공개시스템 [www.airkorea.ok.kr](http://www.airkorea.ok.kr)” 을 통해 우리나라 전역의 미세먼지 농도를 공개하고 있다.

Table 1.2 Diesel engine exhaust gas components [2]

Gaseous matter	Particulate matter	
	Liquid	Solid
CO, CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Soot
NO, NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Metal
SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>	Hydrocarbon(C <sub>15</sub> ~C <sub>40</sub> )	Solid Hydrocarbon
N <sub>2</sub>	Polyaromatic	Inorganic oxide
Hydrocarbon(C <sub>12</sub> ~C <sub>15</sub> )		Sulfates
THC		Volatile ash

미세먼지는 대기 중 직접 배출된 "1차 생성 미세먼지"와 대기 중 오염 물질과 다단계 화학 반응이 일어나 형성된 "2차 생성 미세먼지"로 구분된다. 1차 생성된 미세먼지는 Black Carbon (BC)의 형태로 주로 유기탄소(Organic Carbon, OC)나 원소 탄소(Elemental Carbon, EC)이 주성분인 그을음(soot) 입자로 알려져 있다. 반면 2차 생성먼지는 Figure 1.1에 제시되어 있는 바와 같이 BC가 수산화물(OH)이나 오존(O<sub>3</sub>), 질산염(NO<sub>3</sub>)등과 산화반응을 일으켜 변화된 "유기성 2차 미세먼지"와 이산화황(Sulfur dioxide), 질산염(Nitrate), 암모늄(Ammonium)등이 대기 중 암모니아와 황, 질산화합물과 반응해 생성되는 "무기성 2차 미세먼지"로 분류된다.

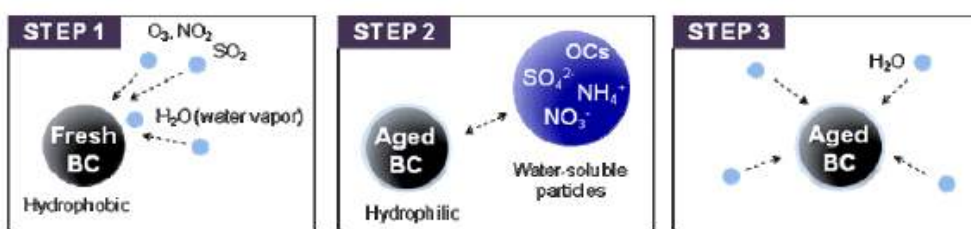


Figure 1.1 Illustration of secondary PM formation process [3]

미세먼지 중 입자 크기가  $2.5\mu\text{m}$  이하인 2차 초미세먼지는 대기 중에 오랫동안 머무르고 장거리를 이동하면서 고농도 미세먼지의 주요 원인이 된다. 또한 초미세먼지는 장기간뿐만 아니라 단기간 노출되어도 인체에 심각한 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다 [4]. 공기 중 유해 중금속과 산성 산화물, 유기 오염 물질, 기타 화학 물질과 쉽게 반응을 일으킬 뿐만 아니라 대기 중에 있는 박테리아 바이러스 등의 미생물을 운반하기도 한다. 호흡을 통해 폐에 축적되어 염증과 폐질환을 야기하고 혈관에 흡착되어 심혈관계 기능에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 세계보건기구 (World Health Organization WHO)는 초미세먼지인  $\text{PM}_{2.5}$  농도가  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  상승할 때 사망률이 0.9%, 호흡기계 질환으로 인한 사망률이 1.3%, 심혈관계 질환으로 인한 사망률이 1.1% 증가했다고 보고한바 있으며 2013년 10월 초미세먼지를 1급 발암물질로 지정하였다 [4, 5].

Figure 1.2에 제시되어 있는 바와 같이 최근 우리나라에서도 사회적 관심을 불러 모으고 있는 미세먼지의 주요 발생원으로 연소 과정을 지목되고 있다. 1차 발생원인 연소 과정으로부터 발생되어 대기 중 존재하는 화합물과 결합하여 생성되는 2차 발생 미세먼지는 일정 시간 동안 입자의 크기별( $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10.0}$ )로 필터를 이용하여 포집하는 중력농도법으로 측정할 수 있지만, 도로/비도로 및 제조업 연소과정을 통해 발생한 탄소 위주의 1차 발생 미세먼지(그을음)는 최근 언론에도 보도된 것처럼 실시간 모니터링 및 측정이 용이하지 않다.

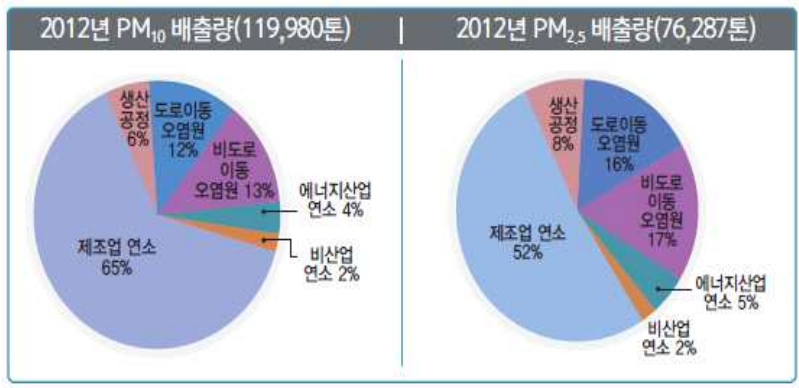


Figure 1.2 Major source for PM emissions in Korea [6]

## 1.2 연구 목적 및 내용

앞서 기술한 것처럼, 연소과정을 통해 발생된 그을음 입자의 농도 측정은 특성상 연소장치의 작동조건(엔진부하, 회전수 등)의 변화 따른 측정이 이루어야하기 때문에 필터로 포집하는 방식인 중력농도법은 적합하지 않으며, 비접촉식 광학법(베타선 흡수법, 광산란법, 광소멸법)으로 측정이 이루어져야 의미 있는 실험결과를 도출할 수 있다. 연소과정 중 발생하는 그을음의 농도를 측정하기 위해 널리 사용되는 비접촉식 광학기법인 광소멸법은 광원과 광검출기만으로도 광학계를 쉽게 구성할 수 있는 장점으로 인해 농도측정이 필요한 현장을 물론 실험실에 이르기까지 광범위한 분야에 적용되고 있다.

Figure 1.3는 광소멸법을 바탕으로 그을음 입자의 농도를 측정하는 EpusT社 [7]의 smoke meter(OP-16010)의 개략도이다. 그림에 볼 수 있는 바와 같이 발광부에는 연초록 LED (563nm)가 광원으로 적용되어 있으며 수광부는 포토다이오드를 광검출기로 사용하고 있다. 채취된 배기가스는 측정실을 통과하는 동안 발광부로부터 측정실의 수평 방향으로 반대편의 위치한 수광부로 빛을 조사하는데, 이 때 그을음 입자의 유입량에 따른 빛의 감소량을 수광부의 렌즈를 통해 집광시켜 포토다이오드에서 인지하여 그을음 입자의 농도가 높고 낮음을 측정하게 된다.

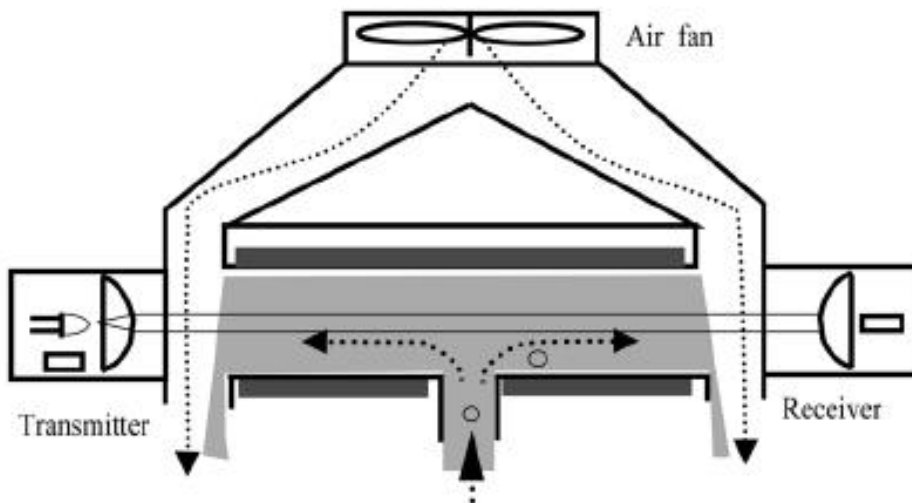


Figure 1.3 Schematics of a typical smoke meter, EpusT OP-16010 [7]

불완전 연소과정을 통해 발생된 그을음 입자는 확산화염의 경우 Figure 1.4와 같이 온도가 높은 화염 내 화염 면을 따라 생성되며, 생성 과정이 흡열반응을 동반하므로

유효 연소열을 낮추어 화염온도에 영향을 줄 수 있다. 특히 그을음 입자의 주성분인 탄소는 복사열손실을 증대시켜 화염온도를 낮추고 화염소멸 현상에 관여하는 것으로 보고되고 있다 [8]. 따라서 화염내부에 존재하는 그을음 입자의 지역적 농도와 분포는 연소현상 연구에 중요한 파라미터이다. 하지만 Figure 1.3에 제시된 smoke meter를 사용하게 되면 간편하게 그을음 입자의 농도를 측정할 수 있지만, 그을음 농도분포를 공간상으로 표현할 수 없고 경로를 따라 적분된 농도만을 측정 가능하다는 단점이 있다.

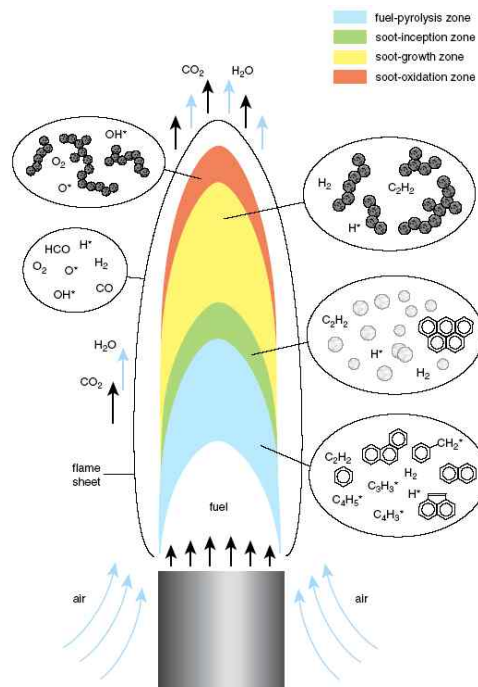


Figure 1.4 Schematic of soot particles formed in a diffusion flame

본 연구에서는 기존의 광소멸법의 한계를 극복하고 화염 내에 생성된 그을음 입자의 지역적 농도와 분포를 측정해 보고자 CCD 카메라를 통해 공간 분해능을 확보하고 광학장치를 추가하여 전역 광소멸 광학계를 구성하였다. 전역 광소멸 광학계로부터 획득한 Laser-backlit 이미지로 부터 광투과율과 투영광도를 측정하고 Dasch[9]가 제안한

3-point Abel 변환 알고리즘을 통해 확산 화염 내부에 생성된 그을음 입자의 지역적 농도와 분포를 계산해 보았다. 아울러 광소멸법을 적용하여 그을음 입자의 농도를 계산하기 위해서 필요한 입자의 무차원 광소멸계수도 측정하였다.



## 제 2 장 실험장치 및 방법

### 2.1 액적 확산화염 내 그을음 농도 측정 실험 장치 및 방법

확산화염 내부의 그을음 농도 측정을 위한 실험 장치는 크게 10 L급 연소 챔버와 진공펌프, 점화장치, 그리고 전역 광소멸 광학계로 구성되어 있으며, 장치 구성의 개략도는 Figure 2.1에 도시되어 있다. SUS304 재질의 연소 챔버는 2쌍의 광학창이 각각 평행하게 설치되어 점화 및 화염 생성 과정을 가시화할 수 있도록 설계·제작되었다. 연소 챔버에는 최대 24 L/min 유량으로 챔버의 감압이 가능도록 진공펌프가 챔버에 연결되어 있고, 가압용기에 저장된 산소(oxygen, O<sub>2</sub>)와 질소 가스(nitrogen, N<sub>2</sub>)를 공급받아 챔버 내에서 혼합할 수 있도록 설계되어 있다.

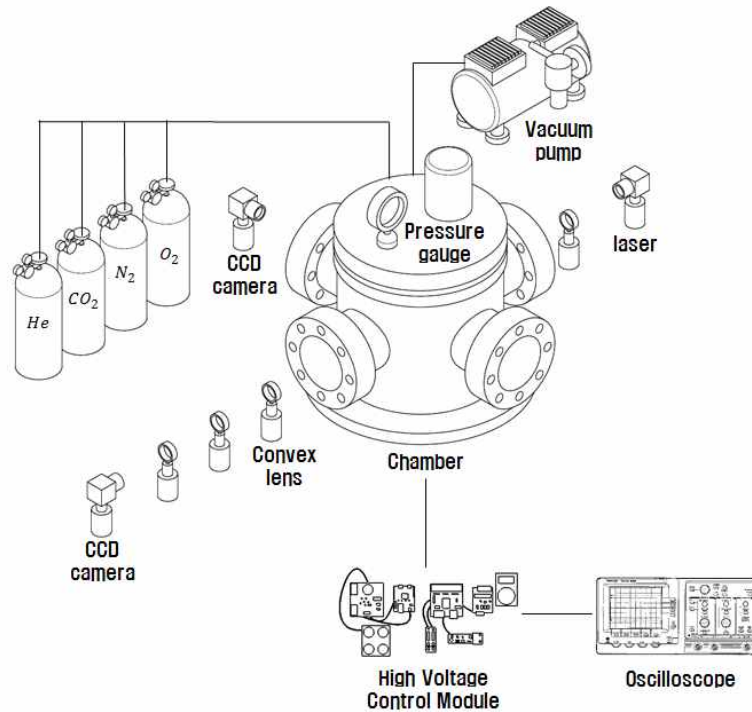


Figure 2.1 Schematic diagram of an experimental setup for measuring the concentration of soot particles

아울러, 연소 챔버에는 감압과 가압 시 내부의 압력을 실시간으로 모니터링하고 제어하기 위해서 아날로그 압력계와 디지털 압력 게이지가 장착되어 있다. 점화장치는 DC-DC 컨버터를 통해 12 VDC의 전압을 최대 350 VDC까지 승압시켜 용량이 큰 콘덴서에 충전한 다음 방전 신호를 인가하면 니크롬선에 방전하여 가열시킬 수 있도록 제작하였다.

본 연구에서는 확산 화염내 발생된 그을음 입자의 가시화를 위해 Figure 2.2에 도시되어 있는 것과 같은 전역 광소멸(Full-field light extinction) 광학계를 구성하였다. 전역 광소멸 광학계의 광원으로는 중심 Peak파장이 635nm인 레이저 다이오드(Figure 2.3)를 사용하였다. 레이저 다이오드에서 발생된 광은 single stage 광파이버를 통해 Beam expander로 전달된다. Beam expander에 전달된 광은 직경이 6배 확장되어 첫 번째 plano convex 렌즈에 전달되고, 두 번째 plano convex 렌즈 사이에서 직경이 70mm인 빔으로 확대되어 세 번째 plano convex 렌즈까지 직진하도록 설계되어 있다.

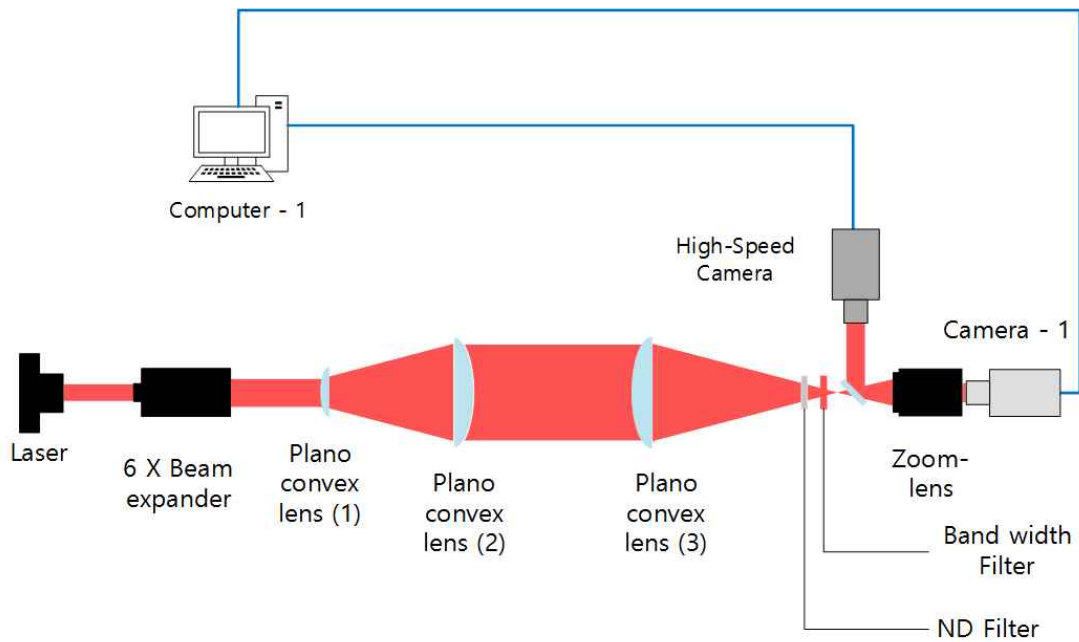


Figure 2.2 Optical configuration for a full field light extinction apparatus

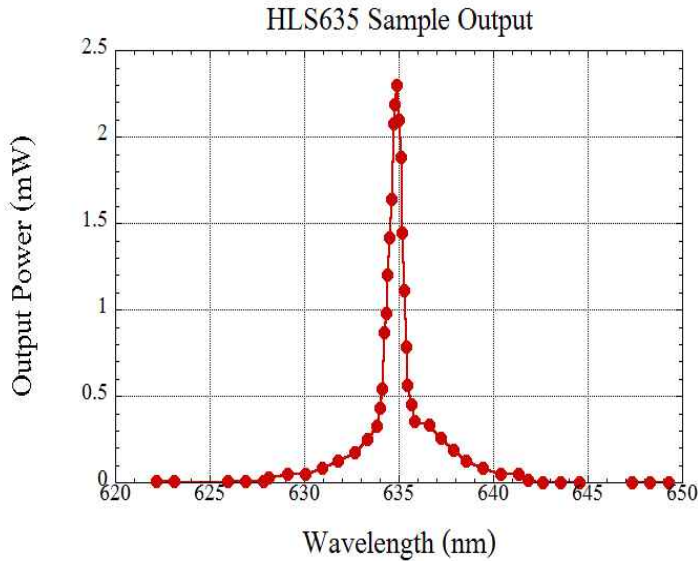


Figure 2.3 Spectral characteristics of a 635nm laser diode

첫 번째 plano convex 렌즈와 두 번째 plano convex 렌즈 사이에서 빔의 직경의 확대율,  $m$ 은 Figure 2.4에 제시되어 있는 Keplerian 광학계의 렌즈 상호간의 상관관계를 나타내는 식 (2.1)로 계산할 수 있다.

$$m = -\frac{f_B}{f_A} = \frac{D}{d} \quad (2.1)$$

식(2.1)에  $d$ 는 첫 번째 plano convex 렌즈의 직경이고,  $D$ 는 두 번째 plano convex 렌즈의 직경이며,  $f_A$ 는 첫 번째 plano convex 렌즈에서 초점까지의 거리이고  $f_B$ 는 초점에서부터 두 번째 plano convex 렌즈까지의 거리를 의미한다. 세 번째 plano convex 렌즈를 통과한 빔은 집광되고, 집광된 빔의 이미지로 부터 화염 이미지를 제거하고 Laser-backlit 이미지만을 획득하기 위해 흡수식 중립 필터(Absorptive neutral density filter)와 635nm에서 Full Width Half Max(FWHM)가 10nm인 대역폭 필터(Bandwidth filter)를 장착하였다. 중립필터와 대역폭 필터를 통과한 빔은 초당 최대 프레임 획득 수가 120fps인 CCD 카메라에 도달하여 최종적으로 Laser backlit 이미지로 PC로 저장된다.

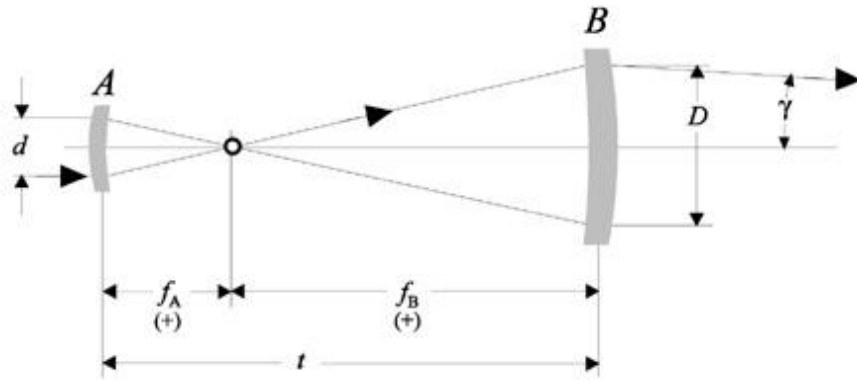


Figure 2.4 Beam expansion using Keplerian optic method

본 연구에서는 난방유로 흔히 사용되는 액체 등유를 연료로 사용하여 액적 확산화염을 생성하였다. 액체 등유의 연소 실험은 Figure 2.1에 제시된 연소 챔버에서 실시하였으며, 화염 내 발생하는 그을음의 양을 증가시키기 위해서 챔버 내의 산소 농도를 30% (molar percent)로 증가 시켰다. 챔버 내 산소농도를 증가시키기 위해 먼저 진공펌프를 이용하여 연소 챔버를 먼저 진공까지 감압하고 산소와 질소 가스를 돌턴의 분압 법칙(Dalton's law of partial pressure)을 이용하여 해당 분압까지 충전하여 산소 농도가 30 %로 유지될 수 있도록 하였다. 즉, 챔버 내의 산소 농도는 식(2.2)를 이용하여 계산하였다.

$$O_2 [mole \%] = \frac{O_2}{O_2 + N_2} = \frac{P_{O_2}}{P_{O_2} + P_{N_2}} \quad (2.2)$$

식(2.2)에서  $P_{O_2}$ 와  $P_{N_2}$ 는 각각 연소 챔버 내에서 산소와 질소 가스의 분압을 의미한다. 이 때 연소 챔버 내의 전압력(total pressure)은 실험이 진행되는 동안 대기압으로 유지할 수 있도록 조정하였다.

본 연구에서는 불연성인 실리카(silica) 섬유를 약 10 cm로 재단하여 연소 챔버 내에 설치되어 있는 포트 양단에 거치하고 정 중앙에 액체 연료인 등유를 액적의 형태로 동일한 양의 적서 점화 실험을 실시하였다. 점화 직전 연소 챔버에 주입된 질소와 산

소가 완전히 쉬일 수 있도록 충분한 시간이 지난 뒤, 콘덴서에 충전된 고전압이 니크롬선에 방전되면서 가열된 니크롬선에 의해 등유를 점화시켰다. 가열된 니크롬선에 의해 점화가 일어난 직후 발생된 화염 및 laser-backlit 이미지는 광학창을 향해 있는 CCD 카메라를 통해 PC에 저장하였으며, 디지털이미지프로세싱 소프트웨어인 Matrox Inspector 8.1®을 이용하여 획득하였다.

## 2.2 그을음 입자의 무차원 광소멸계수 측정 실험 장치 및 방법

확산화염 내부의 그을음 농도를 광소멸법에 의해 계산하기 위해서는 다음 장에 설명되어 있는 바와 같이 해당 연료의 연소과정에서 배출되는 그을음 입자의 무차원 광소멸계수,  $K_e$ 가 필요하다[refs]. 그을음 입자의 무차원 광소멸 계수를 측정하기 위해 본 연구에서 사용된 방법은 광학적 방법에 의해 측정된 농도와 필터로 채집된 입자의 질량 상관관계로부터 역산 하는 방식이다[10]. 이 방식을 적용하기 위해 제작된 실험 장치는 Figure 2.5에 제시되어 있다.

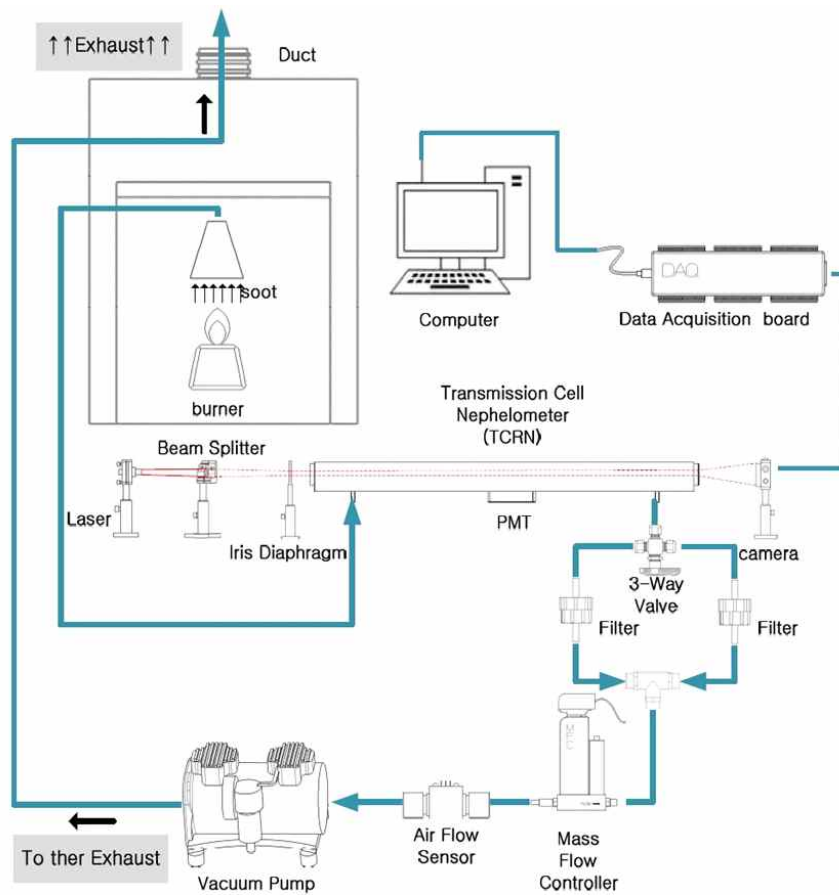


Figure 2.5 Schematic diagram of an experimental-setup for measuring the dimensionless light extinction constant of soot particles

Wick버너에 본 연구에서 사용된 액체 연료인 등유를 주입하고 연소시키면 그을음 입자가 발생되고, Wick버너 화염 끝단으로 부터 방출되는 그을음 입자는 공기와 혼합되어 Transmission Cell (TC) 안쪽으로 유입된다. 확산화염으로부터 생성되는 그을음 입자의 양은 Wick버너의 심지 높이를 조절함으로써 증발되는 연료량을 제어하는 방식을 통해 조절하였다. 그림에 도시되어 있는 TC는 0.8 m × 0.08 m × 0.08 m의 직육면체의 형태로 알루미늄으로 제작되었으며 내부에는 무광 흑색 페인트를 도포하여 표면에 의한 빛의 반사나 산란을 억제할 수 있도록 하였다. TC의 하류 쪽에는 진공펌프(vacuum pump)가 설치되어 공기와 혼합된 그을음 입자가 TC안쪽으로 유입시킬 수 있도록 TC의 상류의 입구와 하류 출구 사이에 압력 차를 발생시킨다. TC에 유입된 그을음 입자는 TC의 양 끝면에 설치된 광학 창을 통해 투과하는 레이저 광원에 노출되게 되며 TC를 통과하는 동안 레이저 광원에 노출되어, (입사되는) 광을 흡수하거나 산란하게 된다 (Figure 2.6).

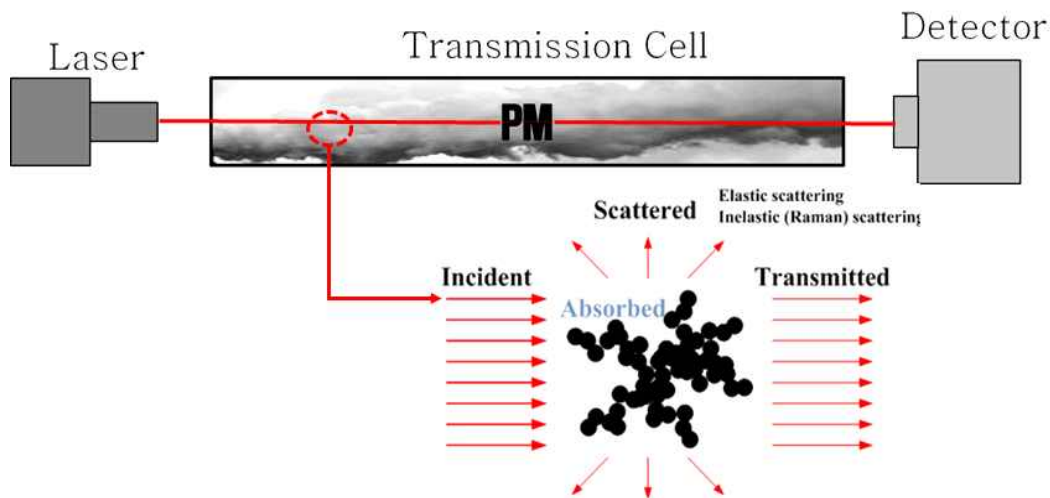


Figure 2.6 Schematics of light extinction by soot particles inside the transmission cell (TC)

그을음 입자의 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해서 사용된 광원은 He-Ne레이저로 파장이 635 nm이며 광소멸로 줄어든 광원의 크기를 측정하기 위해 광원 파장대역의 강도를 검출할 수 있는 광검출기를 설치하였다. TC 하류 선단에는 입자상물질의 채집 장치가 설치되어 있으며, 채집 장치에는 기공(Pore)크기가 0.7 μm인 유리섬유 필터

가 장착되어 공기와 그을음 입자가 혼합된 유동으로 그을음 입자만을 추출하도록 설계되어 있다. 이 때 그을음 입자의 축적으로 발생될 수 있는 필터 양단의 압력 차를 보상하기 위해 필터 후단에는 질량유량계(mass flow meter, MFC)를 설치하였다. 채집 실험은 충분한 양의 그을음 입자가 필터에 채집될 수 있도록 실험 조건에 따라 약 5분 동안 지속하였으며, 필터에 채집된 그을음 입자의 질량은 정밀저울을 이용하여 측정하였다. 그을음 입자의 질량은 채집 실험 전 필터의 무게를 측정하고, 채집 실험을 마친 후 필터의 무게를 각각 측정하여 각 필터 무게의 차를 이용하여 측정하였다.



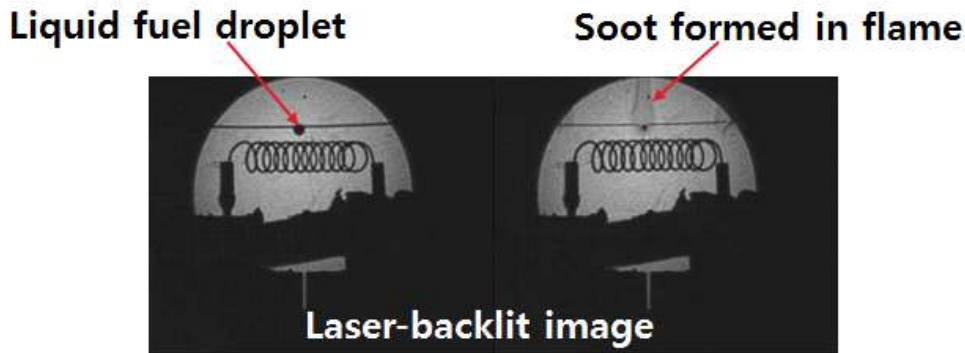
## 제 3 장 실험결과 및 고찰

### 3.1 액적 확산화염 내 그을음 가시화

Figure 3.1은 대기압 상태에서 연소 챔버의 산소 농도가 30 %일 때, 점화가 일어난 직후 CCD 카메라를 통해 저장한 액적 화염과 Laser backlit 이미지이다. 그림을 통해서 관찰할 수 있는 바와 같이 전역 광소멸 장치를 이용하여 저장된 Laser backlit 이미지에서는 그을음 입자의 복사(radiation)로 인해 나타나는 적염의 이미지 (Figure 3.1 a)는 제거되고 화염 내 생성된 그을음(soot) 입자만 나타나게 된다.



a) Color image of droplet diffusion flame



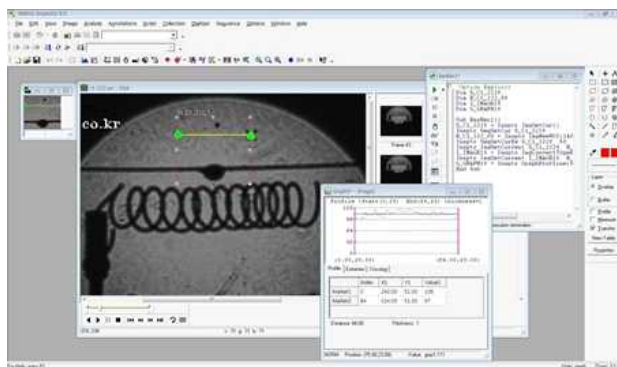
b) Laser-backlit images of droplet diffusion flame

Figure 3.1 Full field laser extinction image of burning liquid droplet fuel

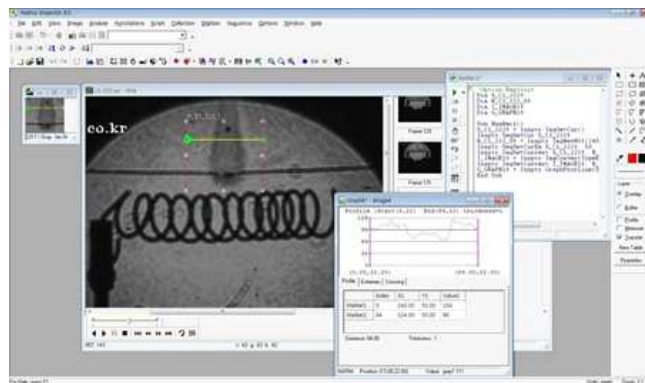
광원에서 발생한 빛은 화염을 투과하면서 화염 내에 생성된 그을음 입자에 의해 산란/흡수되어 입사광의 광도( $I_0$ )는 소멸되어 화염을 투과한 직후 CCD카메라에 도달한 광도( $I$ )는 줄어들게 된다. 전역 광소멸 광학계를 통해 획득된 Laser backlit 이미지에서 레이저 광투과율( $I/I_0$ )은 Bouguer 법칙에 의해 식(3.1)로 나타낼 수 있다[10].

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-K_e \frac{f_v}{\lambda} L\right) \quad (3.1)$$

식(3.1)에서 각각  $K_e$ 는 무차원 광소멸계수,  $f_v$ 는 광학적으로 측정된 그을음 입자의 농도,  $\lambda$ 는 광원의 파장 길이,  $L$ 은 그을음 입자를 투과한 광원의 경로 길이를 의미한다.



a) Laser-backlit image obtained before ignition



b) Laser-backlit image obtained after ignition

Figure 3.2 Calculation process for the laser transmittance using a digital image processing technique

Figure 3.2에서와 같이 디지털 이미지 프로세싱 기법을 적용하면 노란색 선을 따라 동일한 위치에서 디지털로 변환된 광도 값을 추출할 수 있고 화염이 발생하기 전과 후의 광도를 각각 추출하여 식(3.1)에 대입하여 광투과율을 계산할 수 있다. Figure 3.3은 Figure 3.1의 Laser-backlit 이미지에 디지털 이미지 프로세싱 기법을 적용하여 동일한 위치에서 계산된 레이저 광투과율을 도시한 결과이다. 앞서 기술한 바와 같이 화염을 통과한 레이저 광은 화염 내에 생성된 그을음 입자에 의해 산란/흡수되어 전역 광소멸 이미지 상 그을음이 발생된 지점에서 가장 낮은 광투과율을 보이고 있다.

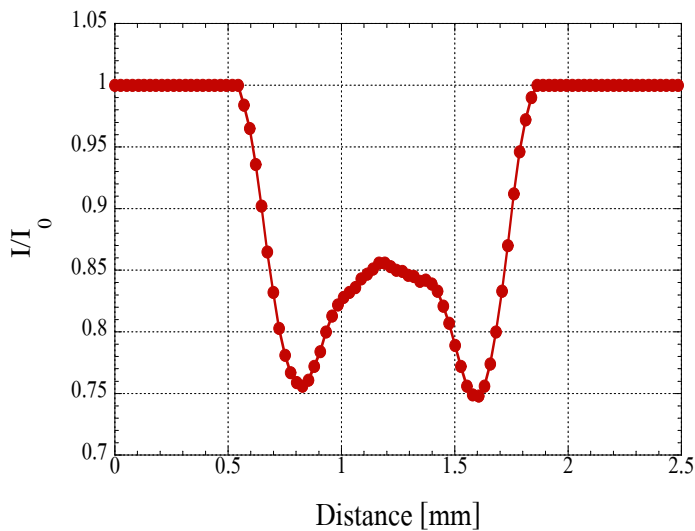


Figure 3.3 Measured laser transmittance through the flame

하지만 화염의 원형 단면을 통과하여 CCD 카메라에 도달한 레이저 광도는 Figure 3.4에 제시되어 있는 바와 같이 시각선(line-of-sight)이 투영된 결과이다. 즉 화염 내부를 통과한 빛의 경로를 적분한 결과를 반영한 투영 광도이다. Figure 3.3에서 계산된 광투과율은 화염 내부를 지나 그을음 입자를 통과하여 CCD 카메라 센서 어레이에 투영된 광도 이므로, 식(3.2)와 같이 표현할 수 있다. 식(3.2)을 이용하면 투영 광도,  $P_{fi}$ 를 계산할 수 있지만, 이 경우 그을음 입자의 무차원 광소멸 계수,  $K_c$ 을 알아야만 한다.

$$P_{fv}(x) = -\frac{\lambda}{K_e} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} f_v[\sqrt{(x^2 + y^2)}] dy \quad (3.2)$$

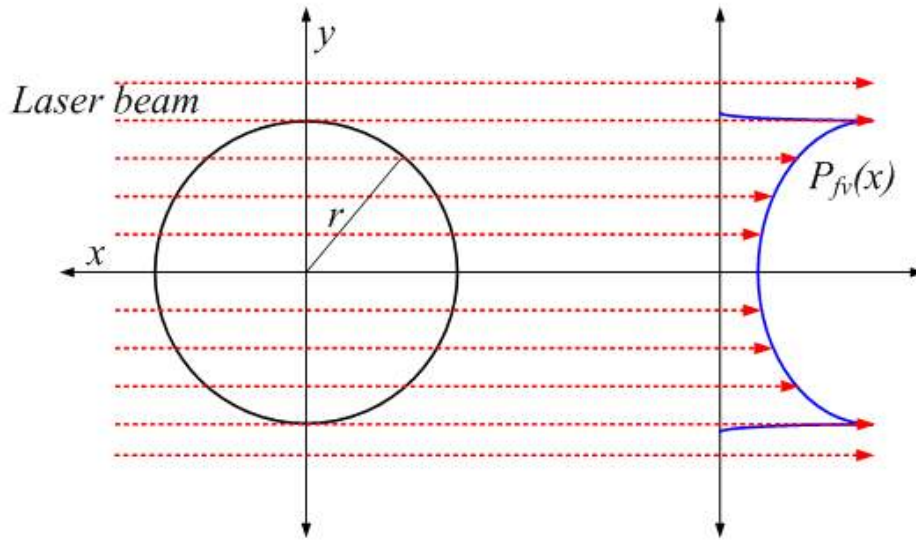


Figure 3.4 Schematics of light-of sight projection distribution

### 3.2 그을음 입자의 무차원 광소멸계수 측정 결과

입자에 의한 광소멸은 Figure 3.5에서 볼 수 있는 바와 같이 입사광의 크기가 입자의 다양한 형상과 화학적 특성에 의하여 산란되고 흡수되어 줄어드는 현상으로 입자의 굴절지수 (refractive index)에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 한편, 탄화 수소계 연료의 불완전 연소과정을 통해 발생하는 그을음 입자의 굴절지수는 연료의 종류에 따라 달라지고 무차원 광소멸계수에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 이번 장에서는 등유의 연소과정에서 발생하는 그을음 입자의 무차원 광소멸계수를 측정에 관한 내용을 기술하였다.

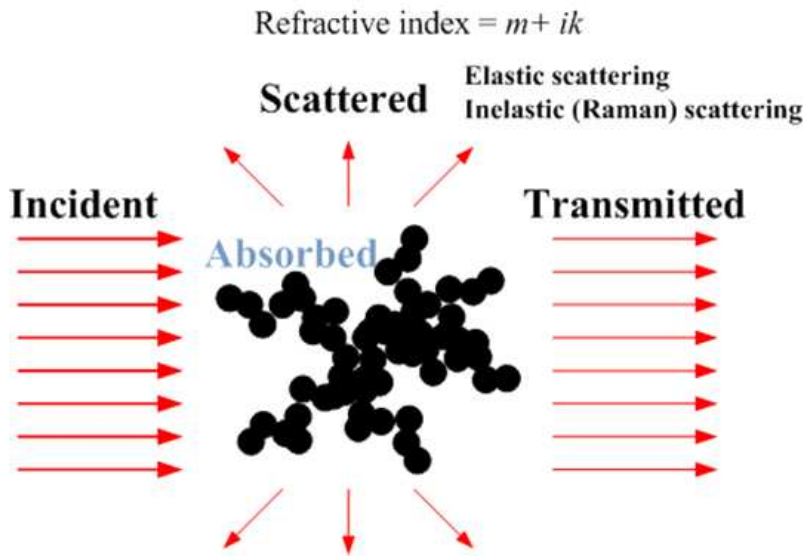


Figure 3.5 Light extinction (absorption and scattering) induced by particles

앞서 기술한 것처럼, 본 연구에서 그을음 입자의 무차원 광소멸 계수를 측정하기 위해 사용된 방법은 광학적 방법에 의해 측정된 농도와 필터로 채집된 입자의 질량 상관관계로부터 역산 하는 방식이다[10]. 즉 필터로 측정한 그을음 입자의 농도,  $f_{vg}$ 를 식 (3.3)로 계산하고 식(3.1)로 계산한 광학적 농도와 비교하는 방식이다.

$$f_{vg} = \frac{m}{Vt\rho} \quad (3.3)$$

식(3.3)에서  $m$ 은 필터에 채집된 그을음 입자의 질량,  $V$ 는 TC에 유입된 공기의 유량,  $t$ 는 채집시간,  $\rho$ 는 그을음 입자의 밀도이다. 본 연구에서는 그을음 입자의 밀도는 연료와 상관없이 널리 사용되는 soot입자의 밀도값 ( $1.7 \text{ g/cm}^3$ )을 적용하였다[11]. 식(3.3)에 의해 계산된 그을음 입자의 농도,  $f_{vg}$ 는 동일한 시간대에 광투과율( $I/I_0$ )의 평균값을 식 (3.1)에 대입하여 계산한 농도,  $f_v$ 와 같아야 한다.

$$f_v = f_{vg} = -\frac{\lambda \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{LK_e} \quad (3.4)$$

결국, 무차원 광소멸계수,  $K_e$ 는 식(3.5)을 통해 최종 계산할 수 있다 [10, 11].

$$K_e = - \frac{Vt\rho\lambda \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{Lm} \quad (3.5)$$

Figure 3.6는 그을음입자와 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 광원의 입사강도 ( $I_0$ )를 광검출기로 측정된 뒤 입자상물질이 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광원의 강도( $I$ )를 측정하여 계산한 광투과율( $I/I_0$ )을 도시한 것이다.

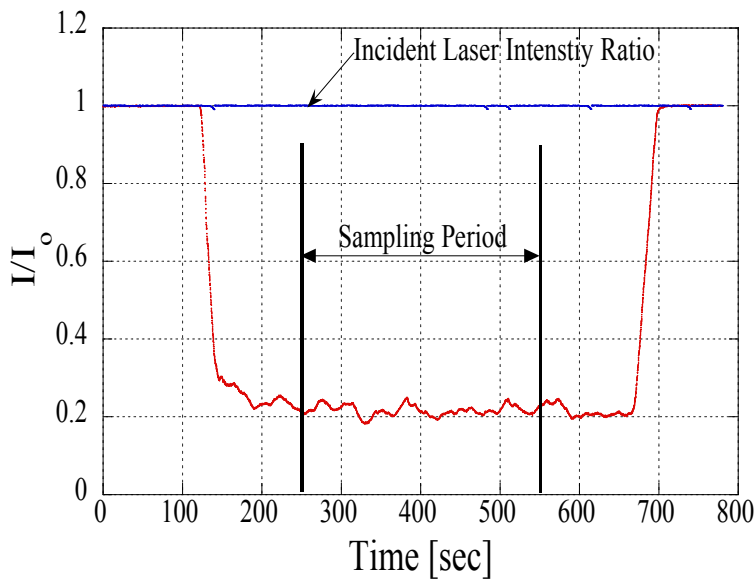


Figure 3.6 Measured transmitted laser intensity ratio as a function of time

그림에 제시되어 있는 바와 같이 그을음 입자와 혼합된 공기가 TC에 유입되기 전과 공급이 중단된 뒤의 광투과율( $I/I_0$ )은 항상 일정하였다. 즉, 그을음 입자가 TC에 유입되기 전과 후의 광투과율이 일정하였으므로 TC에 잔류하는 그을음 입자는 없다고 가정할 수 있다. 또한 그림에서 확인 할 수 있는 것처럼 그을음 입자의 채집구간에서 (레이저와 평행선상에 있는 광검출기를 이용하여) 측정된 광원의 크기변화가 없었으므로

광원의 안정성(stability)을 확보였다고 할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 그을음 입자와 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입이 시작된 직후부터 광투과율은 급격히 감소하여 곧 준정상 상태 (quasi-steady state)에 도달하였다. 광투과율이 준정상 상태에 도달한 직후부터 TC하류에 설치된 채집장치의 필터를 통해 입자상물질을 채집하기 시작하였고 이때 준정상 상태에 도달한 평균 광투과율( $I/I_0$ )을 식(3.5)에 대입하여 그을음 입자의 무차원 광소멸계수를 계산하였다.

Figure 3.7 에는 필터에 채집된 그을음 입자의 질량과 채집시간 동안 얻어진  $\ln(I/I_0)$  평균값과의 상관관계가 도시되어있다. 그림에서 보이는 바와 같이 TC안쪽으로 유입된 연기입자의 양이 0.01 ppm에서 0.19 ppm으로 증가함에 따라  $-\ln(I/I_0)$  평균값이 0.2 (optically-thin)에서 3.5 (optically-thick)사이에서 선형적으로 변화하고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 필터에 채집된 입자상물질의 체적분율과 광학적으로 측정하게 될 체적분율이 서로 선형적 상관관계가 있음을 의미하며 식(2.3)에 적용된 가정( $f_v=f_{vg}$ )의 타당성을 뒷받침하는 결과이다. Table 3.1에는 Figure 3.7에서 사용된 광투과율( $-\ln(I/I_0)$ )에서 측정된 무차원 광소멸계수의 결과를 정리한 결과이다. 정리되어 있는 바와 같이 측정된 등유 연료 입자상물질의 무차원 광소멸계수( $K_e$ )의 평균값은  $11.3 \pm 0.3$  이다.

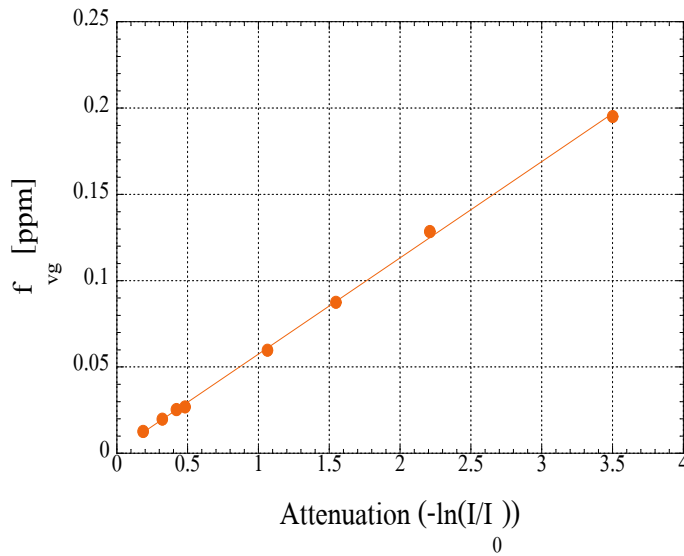


Figure 3.7 Measured soot concentration as a function of laser transmittance

Table 3.1 Summary of measured  $K_e$  for Kerosene fuel

$-\ln(I/I_0)$	$f_{vg}$ [ppm]	$K_e$
0.32	0.02	10.4
0.42	0.03	10.8
0.19	0.01	9.5
0.48	0.03	11.5
1.06	0.06	11.6
3.50	0.20	11.7
1.55	0.09	11.5
2.21	0.13	11.2



### 3.3 액적 확산화염 내 그을음 농도 계산 결과

Figure 3.8은 측정된 그을음 입자의 무차원 광소멸계수를 식 (3.2)에 대입한 계산한 투영 광도를 도시한 그래프이다.

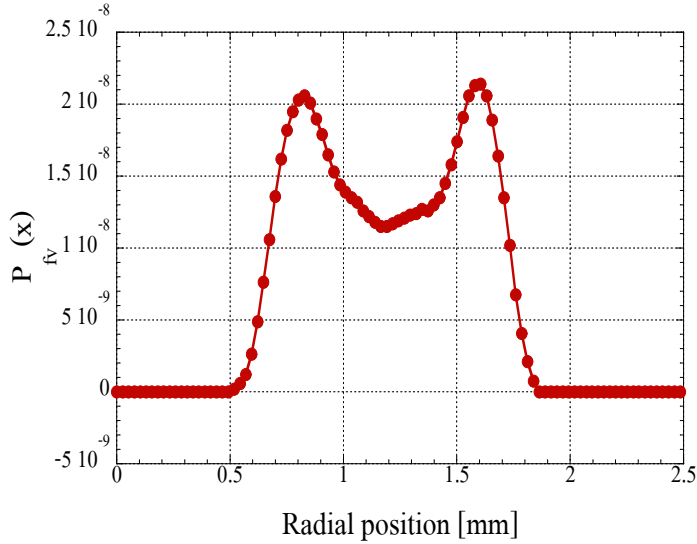


Figure 3.8 Calculated projected profile with the measured Ke

Figure 3.4에서와 같이 원형으로 대칭적인 분포를 갖는 그을음 입자의 농도 분포  $f_v(r)$ 의 미소 광의 합으로 투영한  $P(r)$  함수인 식(3.6)으로 다시 표현할 수 있다 [11].

$$P(r) = 2 \int_r^\infty \frac{r' f_v(r')}{(r'^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} dr' \quad (3.6)$$

광투과율의 투영 데이터( $P(r)$ )로부터 그을음의 농도( $f_v$ )를 분해적 추정 방식으로는 onion-peeling과 Abel 변환 기법 주로 사용되며, 그 중에서도 일반적으로 Abel 변환을 사용함으로써 상대적으로 잡음(noise)을 줄일 수가 있는 것으로 보고 되고 있다[9]. 식 (3.6)에 주어진  $P(r)$ 을 Abel 변환을 이용하여 역변환하면 식(3.7)를 통해 그을음 입자의

분포함수  $f_v(r)$ 을 구할 수 있다.

$$f_v(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^\infty \frac{P'(r)}{(r'^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} dr \quad (3.7)$$

여기서  $P'(r)=dP/dr$  이며, 그을음 입자의 분포함수  $f_v(r)$ 은  $\Delta r$ 의 주위에서의 선형적 가중치,  $D_{ij}$ 와 데이터 투영함수  $P(r_j)$ 의 곱으로 계산할 수 있다[9].

$$F(r_i) = \frac{1}{\Delta r} \sum_{j=0}^{\infty} D_{ij} P(r_j) \quad (3.8)$$

따라서 식(3.7)의 Abel 변환 적분 식은 각각  $r_j$ 의 주위의 부분에서 선형 가중치,  $D_{ij}$ 를 결정하기 위해 식(3.9)과 같이 표현 될 수 있다.

$$f_v(r_i) = -\frac{1}{\pi} \sum_{j=i}^{\infty} \int_{-\Delta r/2}^{\Delta r/2} \frac{P'(r_j + \delta)}{[(r_j + \delta)^2 - r_i^2]^{\frac{1}{2}}} d\delta \quad (3.9)$$

각 부분에 이웃한  $P'(r)$ 의 함수는  $r_j$ 의 주변지역에서 중앙차분법(central difference method)을 이용하여 2차 항까지 고려한 식(3.10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P'(r_j + \delta) = [P(r_{j+1}) - P(r_{j-1})]/2\Delta r + [P(r_{j+1}) + P(r_{j-1}) - 2P(r_j)]\delta/\Delta r^2 \quad (3.10)$$

또한 각 부분에서 Abel 적분식은 분해적으로 계산해 낼 수 있으며 결과는 식(3.11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_v(r_i) = & -\frac{1}{2\pi} \sum_{j=i}^{\infty} [I_{ij}(1) - I_{ij}(0)] P(r_{j-1}) \\
 & - 2I_{ij}(1) P(r_j) + [I_{ij}(1) + I_{ij}(0)] P(r_{j+1})
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

여기서,  $I_{ij}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{\delta^n}{\sum_{j=i}^{\infty} [(2j+\delta)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}}} d\delta$  이다.

$I_{ij}$  값은 시작점 0과 -1에서 각각의 적분을 수행하면 수치적으로 접근이 가능하며 식 (3.12)와 같다.

$$\begin{cases}
 0 & j < i-1 \\
 I_{ij+1}(0) - I_{ij+1}(1) & j = i-1 \\
 I_{ij+1}(0) - I_{ij+1}(1) + 2I_{ij}(1) & j = i \\
 I_{ij+1}(0) - I_{ij+1}(1) + 2I_{ij}(1) - I_{ij-1}(0) \\
 \quad - I_{ij-1}(1) & j \geq i+1 \\
 I_{ij+1}(0) - I_{ij+1}(1) + 2I_{ij}(1) - I_{ij-1}(1) & i=0, j=1
 \end{cases} \tag{3.12}$$

여기서,  $I_{ij}(0) =$

$$\begin{cases}
 0 & j = i = 0 \text{ or } j < i \\
 \frac{1}{2\pi} \ln \frac{[(2j+1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} + 2j+1}{2j} & j = i \neq 0 \\
 \frac{1}{2\pi} \ln \frac{[(2j+1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} + 2j+1}{[(2j-1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} + 2j-1} & j > i
 \end{cases}$$

$I_{ij}(1) =$

$$\begin{cases} 0 & j = i = 0 \text{ or } j < i \\ \frac{1}{2\pi} [(2j+1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} + 2jI_{ij}(0) & j = i \neq 0 \\ \frac{1}{2\pi} [(2j+1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} - [(2j-1)^2 - 4i^2]^{\frac{1}{2}} + 2jI_{ij}(0) & j > i \end{cases}$$

본 연구에서는 식(3.9)~식(12)에 제시된 3-point Abel 변환의 해석적 해를 fortran으로 코딩하여 해를 구하였으며, 변환의 해인 그을음 입자의 농도 분포 함수 결과를 Figure 3.8에 도시하였다. 그을음 입자의 농도 분포는 Figure 3.8에 제시된 투영 광도와 유사한 증감 형태를 내지만 국지적으로 최대 그을음 농도 폭(peak to peak width)이 더 좁게 나타나는 것을 확연히 관찰할 수 있다.

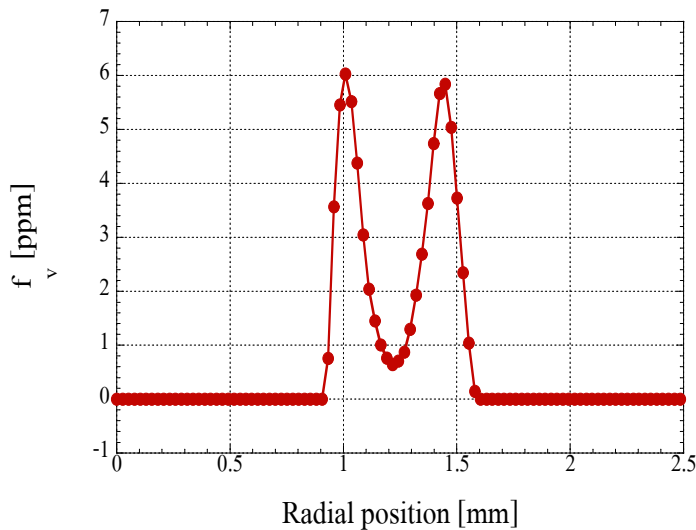


Figure 3.9 Calculated concentration distribution for soot particles within the flame

Abel 변환은 측정되는 데이터가 원형적으로 대칭이어야 하며 광학 방향으로의 변환 간격,  $\Delta r$ 에 따라 작은 잡음(noise)도 Abel 변환을 함으로써 증폭이 되어 결과에 영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 Figure 3.10에  $\Delta r$ 의 간격을 넓혀 그을음 분포 공간 및 농도의 분해능의 변화를 도시해 보았다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이

26 mm를 26개의 투영 데이터를 이용하여 등 간격 (1mm 간격)으로 Abel 변환을 실시한 경우와 20개의 투영 데이터(1.3 mm 간격)를 이용하여 등간격으로 변환을 실시한 경우는 그을음의 분포와 농도에서 크게 차이를 보이지 않지만 그 이하의 투영 데이터를 이용하여 변환을 실시하게 되면 그을음의 분포와 농도의 결과에서 큰 차이를 보이게 됨을 알 수 있다.

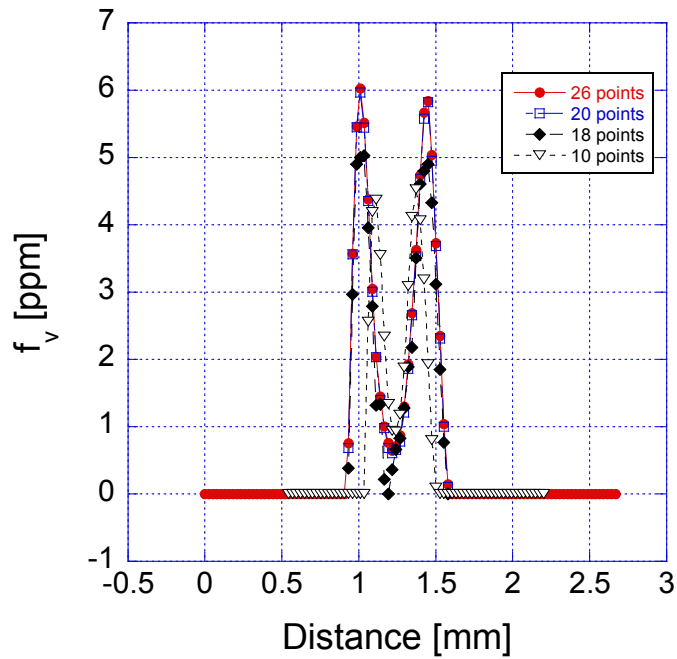


Figure 3.10 Variations in soot distribution and concentration affected by Abel inversion

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 등유-공기 액적 확산화염 내에 생성된 그을음 입자의 농도와 분포를 측정해 보기 위해서 Laser-backlit 이미지를 얻을 수 있는 전역 광소멸 광학계를 설계·제작하였다. 화염 내부에 존재하는 그을음 입자의 국소 분포 및 농도를 측정하기 위해 본 연구를 통해 제작된 전역 광소멸 광학계는 입자에 의해 발생된 입사광의 광소멸 현상을 CCD 카메라를 이용하여 측정하게 된다. 그을음 입자에 의해 소멸된 광도를 CCD 카메라로 측정하기 위해 광투과율을 우선 측정하였고, 이 때 측정된 광투과율은 CCD 카메라 센서 에레이에 투영된 광도이므로 3 point Abel Deconvolution 기법을 적용하여 측정된 투영 광도로 부터 그을음 입자의 농도를 계산하였다. 아울러 광소멸 기법을 적용하여 그을음 입자의 농도 계산에 필요한 무차원 광소멸 계수는 중력식 필터법으로 채집된 그을음 입자의 질량을 농도로 환산한 뒤, Bouguer 법칙을 적용하여 광학적인 방법으로 측정한 농도와 비교하여 무차원 광소멸 계수를 계산하였다.

등유-공기 확산화염 내에 생성된 그을음 입자의 농도와 분포를 측정하기 위해 본 연구를 통해 수행된 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 등유-공기 확산화염으로부터 발생된 그을음 입자의 무차원 광소멸 계수는  $11.3 \pm 0.3$  이다.
- (2) 3-point Abel Deconvolution 변환 기법을 통해 CCD 카메라에 투영된 광투과율 정보로 부터 화염 내부에 생성된 그을음 입자의 지역적 공간 분포 및 농도를 복원할 수 있는 것을 확인 하였다.
- (3) 3-point Abel Deconvolution 변환 시 광학 방향으로의 변환 간격,  $\Delta r$ 의 간격이 증가함에 따라 변환 결과는 크게 달라지며, 투영 데이터로부터 유의미한 그을음 입자의 공간 분포 및 농도 분해능을 얻기 위해서는 최소  $\Delta r$ 은 1.3 mm 이하여야 함을 확인할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이연, “Urea-SCR을 적용한 디젤 배기가스의 NO<sub>x</sub> 저감을 위한 수치적 연구”, 박사학위 논문, 호서대학교 (2016)
- [2] 백운도, “승용 디젤기관에서 Urea-SCR 시스템의 NO<sub>x</sub> 저감 및 NH<sub>3</sub> slip 특성에 관한 실험적 연구” 석사학위논문, 국민대학교 (2016)
- [3] 이시혜, “블랙카본을 포함한 축적모드 에어로솔의 화학적, 광학적 특성과 수분흡습성에의 영향”, 박사학위논문, 서울대학교 (2011)
- [4] 그린피스 “침묵의 살인자, 초미세먼지 한국 석탄화력발전의 건강 영향과 정책의 현주소” (2015)
- [5] 국립환경과학원 2009 “PM<sub>2.5</sub> 대기환경기준 설정을 위한 연구”
- [6] 환경부 “바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?”, (2016)
- [7] 강일호, 이충훈, “광투과식 매연 측정법을 이용한 소형 디젤 차량의 무부하 급가속 조건에서의 매연 배출 특성”, 한국안전학회지 Vol 27(3), pp 1-8, (2012)
- [8] Shaddix, C.R. , Palotas, A. B., Megaridis, C. M., Choi, M. Y., and Yang, N. C., “Soot Graphitic Order in Laminar Diffusion Flames and a Large-Scale JP-8 Pool Fire”, Int. J. of Heat Mass Trans.48, pp. 3604-3614, (2005)
- [9] Dasch, C. J., “New Soot Diagnostics in Flames Based on Laser Vaporization of Soot”, Proc. Combust. Inst. 20, pp. 1231-1237, (1984)
- [10] Zhu, J. Y., M. Y. Choi, G. W. Mulholland and L. A. Gritzo, “Measurement of soot optical properties in the near-infrared spectrum,” International Journal of Heat and Mass Transfer 43, pp. 3299-3303, (2000).

[11] Choi, M. Y., G. W. Mulholland, A. Hamins, and T. Kashiwagi, “Comparisons of soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques”, *Combustion and Flame* 102, pp. 161-169, (1995).