

< 논문 >

엔진 배기단 적용을 위한 Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE-LII) 신호의 보정 : 카본 입자 이용

오광철[†] · 김덕진* · 이천환* · 이춘범*
(2005년 7월 19일 접수, 2005년 10월 20일 심사완료)

The Calibration Method of Time Resolved Laser Induced Incandescence Using Carbon Black Particles for the Soot Measurement at Exhaust Tail Pipe in Engine

Kwang Chul Oh, Deok Jin Kim, Chun Hwan Lee and Chun Beom Lee

Key Words: TIRE-LII(시간분해능을 가진 레이저유도 백열법), Decay Rate(감소율), Carbon Black(카본 블랙), Primary Soot Particle Diameter(매연 입자 직경), Exhaust Tail Pipe(배기단)

Abstract

The calibration technique of Time Resolved Laser Induced Incandescence was investigated both experimentally and numerically by using standard-sized carbon black particles for the instantaneous soot measurement at exhaust tail pipe in engine. The carbon black particles (19nm, 25nm, 45nm and 58nm) used in this study are similar, though not identical, to soot particle generated from flame not only in morphology but also in micro-structure. The amount of soot loading in flow was controlled by a diluted gas (nitrogen) and was measured by the gravimetric method at exhaust pipe in calibrator. The successful calibrations of primary particle size and soot mass fraction were carried out at the range from 19nm to 58nm and from 0.25mg/m³ to 37mg/m³ respectively. And based on these results the numerical simulation of LII signal was tuned and the effect of an exhaust temperature variation on the decay rate of LII signal was corrected.

1. 서론

기호설명

Q_{CB} : carbon black 혼합기체의 유량 [l/min]
 Q_{dil} : 희석가스의 유량 [l/min]
 Q_{ato} : 분무기에서의 분무유량 [l/min]
 $1/\tau$: LII 신호의 감소율
 D_p : 주요 입자 직경 (평균 입자 직경)
 T_{exh} : 배기가스 온도
 soot emission: 단위 부피당 매연의 무게 [g/m³]

디젤 입자상 물질의 유해성이 배출되는 양 뿐만 아니라 그 크기에 관련되어 있다고 알려짐⁽¹⁾에 따라 근래에 입자 크기 측정에 관하여 관심을 갖게 되었다. 입자의 크기를 측정하는 방법은 오래전부터 다양하게 연구 되어왔는데, 가장 확실한 방법은 매연을 일정량 포집하여 무게를 측정함으로써 그 양을 측정하고 전자현미경으로 입자를 촬영하여 크기를 측정하는 방법이겠지만 이 방법은 측정 시간도 오렐 뿐만 아니라 과정이 복잡하고 ex-situ라는 한계를 극복할 수 없다. 따라서 최근에는 ELPI(Electrical Low Pressure Impactor), SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer), LII(Laser Induced Incandescence)등이 디젤 입자상 물질의 평가 방법으로 주로 언급되고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 자동차부품연구원 환경부품연구센터
E-mail : kcoh@katech.re.kr

TEL : (041)559-3089 FAX : (041)559-3242

* 자동차부품연구원 환경부품연구센터

ELPI는 공기역학적 방법(aerodynamic method)으로 가속된 하전 입자가 갖는 관성의 차이를 이용하여 다단 임팩터에 크기별로 구분하는 원리이며, SMPS는 전자적 이동성(electrical mobility)을 이용하는 방법으로 전기장에 의해 대전된 입자의 이동성을 이용하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 매연 입자뿐만 아니라 엔진에서 발생하는 회분을 구분할 수 없고, tar 형태의 입자나 입자를 덮고 있는 응축 물질의 영향^(2,3)을 정확히 평가할 수 없다. 이에 반해서 레이저를 이용하는 LII 방법은 입자의 운동성(mobility)과는 전혀 다른 방법으로, 레이저에 조사된 입자의 열적 평형을 기본으로 조사된 레이저 에너지 흡수와 복사 방출된 에너지로부터 매연 입자에 대한 정보를 얻기 때문에 매연 입자의 측정 측면에선 위와 같은 어려움을 극복할 수 있는 방법이다.

매연 입자의 평균입경의 측정은 LII 신호의 감소율을 가지고 측정하게 되는데 이러한 측정의 방법은 일반적으로 TIRE-LII(Time Resolved LII)라고 알려져 있다.^(4,5) 레이저에 의해 가열된 입자가 주위로의 열전달에 의해 냉각될 때 온도 기울기 즉, LII 신호의 감소율이 입자의 입경과 반비례하는 것을 이용함으로써 입경 측정이 가능하게 된다.⁽⁶⁾ 따라서 LII 방법은 매연의 양뿐만 아니라 매연입자의 평균입경을 실시간적으로 측정을 할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 디젤 입자상 물질을 계측할 때 가장 문제가 되는 점은 샘플링 과정과 계측 과정에서 본래의 형태와 크게 변할 수 있기 때문에 정확한 입자의 계측을 위해서는 측정 체적에서 입자의 상태에 대한 변형의 요인을 제거하고, 간단한 구조로 제작하여 이동이나 휴대가 가능하도록 하고, 유지 보수가 간단한 형태가 요구되고 있고, LII 시스템은 이러한 요구조건 또한 잘 충족될 수 있는 방법으로 생각되어진다. 하지만 LII 방법은 상대적인 크기의 정보만을 제공하기 때문에 정량적인 측정을 위해서는 보정 방법의 확립이 절실히 요구되고 있다.

실제 엔진의 배기관에서 LII 기술을 적용하기 위해서는 잘 알고 있는 크기의 매연 입자에 대하여 LII 신호의 보정이 필요하고 기존 연구가들에 의해서 다양한 보정방법이 알려져 있다. 가장 일반적인 방법으로 동축류 확산화염에서 서로 다른 C/H 비를 갖는 연료를 사용하여 화염을 형성하고, 화염의 적절한 위치에서 매연을 포집하고 이

것에 대하여 LII 신호와 전자현미경(TEM) 이미지를 비교하는 방법이다. 그러나 이러한 방법은 매연의 질량유량을 측정하기 곤란하고, 매연이 존재하는 영역이 고온부이고 온도구배가 커서 적절한 포집이 이루어지가 어렵다. 다음은 LII 계산에 의한 방법이 있는데 이러한 방법은 온도 조건이나 레이저세기의 변화에 대한 많은 정보를 얻을 수 있는 반면에 위의 보정방법과 같은 과정에 의한 계산과정의 고찰(tuning)이 필요하고 매연의 양에 대한 정보를 얻을 수 없다.^(7,8) 따라서 본 연구에서는 잉크의 원로나 프린터 토너 등에 사용되는 카본 블랙을 이용하여 매연의 양뿐만 아니라 입경의 보정을 수행하였다. 본 연구에 사용된 카본 블랙은 제작원리가 매연의 생성원리와 기본적으로 같아서 화염에서 생성되는 매연과 형상학적 측면뿐만 아니라 미세구조가 비슷하다.^(9,10) 그리고 제품의 사양이 상세하게 제공되기 때문에 LII 신호를 예측하기 위한 계산을 할 경우 신뢰성 높은 값을 얻을 수 있고, 질량유량이나 부피분율등 모사 가스의 사양을 비교적 손쉽게 제어할 수 있다는 장점이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 카본 입자는 columbian chemicals 사의 19nm (HIBlack 41Y), 25nm (HIBlack 300), 45nm (HIBlack 150B), 58nm (HIBlack 170)이다. 입자를 원하는 농도로 고르게 흘리기 위해서 분무기를 제작하였다. 입자를 이소프로필알코올과 고르게 혼합하고 질소 가스와 혼합하여 적당량을 일정한 공간에 분무하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 입자 발생 장치이다. 입자를 일정하고 균일하게 띄우는 분무부(atomizer)와 희석 가스와 혼합되는 혼합부(mixer), 레이저가 조사되고 신호를 측정하기 위한 측정부 그리고 측정부를 지나간 카본 입자의 무게를 측정하기 위한 필터부, 4부분으로 나눌 수 있다. 앞에서 언급했듯이 카본 입자를 이소프로필알코올과 혼합(카본 입자: 0.3133g + 알코올 : 250ml)하여 초음파분쇄를 통해 균일한 혼합액을 만든 후, 100ml정도를 분무부에 넣고 질소를 일정유량을 흘림으로써 자연스럽게 분무되게 하였다. 그리고 분무량을 일정하게하고 후단에

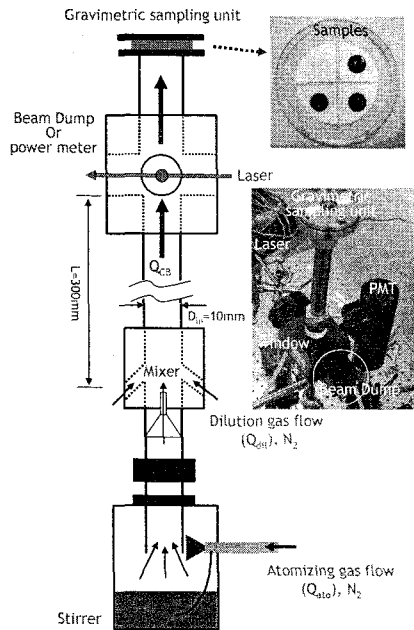


Fig. 1 Experimental setup: carbon black mixture generator and gravimetric sampling device

서 추가적인 질소를 공급함으로써 입자의 농도를 제어하였다. 이렇게 혼합된 입자는 측정부를 지나면서 레이저에 의해 가열되고 가열된 신호는 PMT를 통하여 측정하였다. 맨 후반에는 매연 필터(Pallflex membrane filters, Fberfilm T60A20)를 두어 입자를 포집하고 무게를 측정하여 입자의 총량을 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 매연농도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SootEmission = \frac{m_{CB}}{Q_{ato} + Q_{dil}} \quad (1)$$

여기서 m_{CB} 는 포집된 매연의 질량으로 미세한 저울(최소 측정무게 0.01mg)에 의해 측정이 가능하기 때문에 Q_{ato} 와 Q_{dil} 을 조정함에 따라 분무된 입자의 양을 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 분무유량을 일정하게 유지($Q_{ato}=1500scc/min$)하고 희석유량을 바꿈으로써 매연 입자의 양을 변화시켰다.

Fig. 2는 전체적인 장치 사진이다. 매연 입자의 가열을 위한 레이저로는 ND-YAG 레이저(532nm, 130mJ/pulse)를 이용하였고, mirror를 사용하여 측정부에 조사하였다. LII 신호는 400nm 중심파장, 10nm 반치 폭을 갖는 필터가 부착된 PMT를 사용하여 계

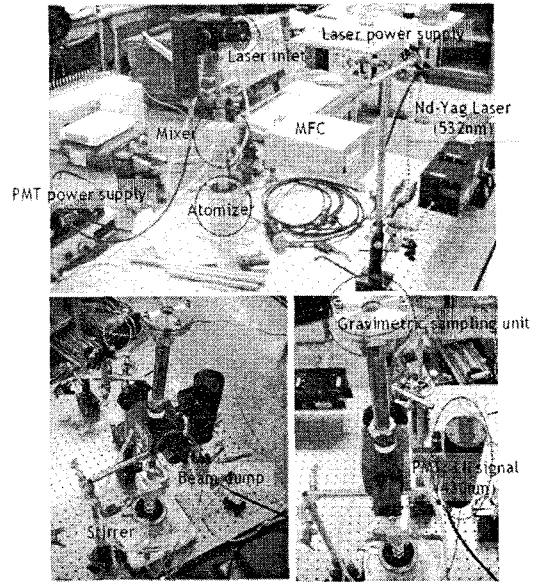


Fig. 2 Experimental setup for LII measurement

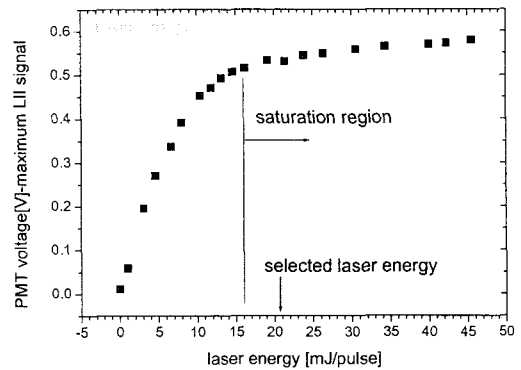


Fig. 3 LII signal intensity according to laser fluence

측되었고 수백 nsec의 입자의 가열과 냉각의 과정동안의 LII 신호를 취득하기 위해 오실로스코프(1Gs/sec)를 이용하였다. 모든 유량은 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 조절하였다.

2.2 실험 장치 검증 및 조건의 설정

조사된 레이저 빔의 세기에 따른 LII 신호의 세기를 측정하였다. Fig. 3에서 보는 것처럼 레이저세기 가 증가함에 따라 LII 신호의 세기가 증가한다. 그리

다가 레이저 세기가 16mJ/pulse 이후에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 레이저세기가 증가함에 따라 LII 신호의 세기는 매연 입자의 가열된 온도에 따라 증가하다가 매연 입자가 증발온도까지 가열이 되면 입자에 흡수된 에너지는 대부분 입자의 증발에 기여하기 때문에 신호의 세기는 레이저 세기에 둔감하게 된다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 따라서 본 실험에서는 레이저 세기의 변화에 둔감하고 입자의 증발을 최소화 할 수 있는 20mJ/pulse의 레이저세기를 이용하였다.

Fig. 4은 PMT를 통해 얻어진 LII 신호이다. 19nm의 카본 입자를 1500cc/min로 분무했을 때 LII 신호와

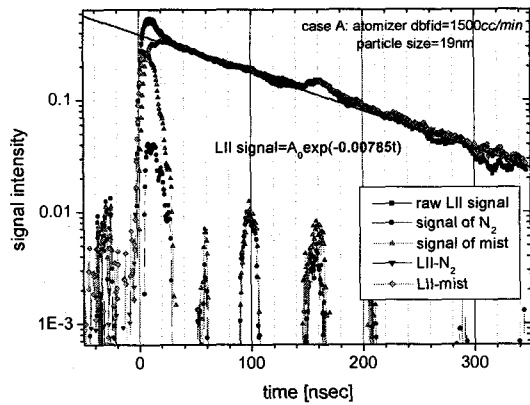


Fig. 4 The relative signal intensities come from LII (soot), N₂, isopropyl alcohol (Q_{ato}= 1500cc/min, D_p=19nm)

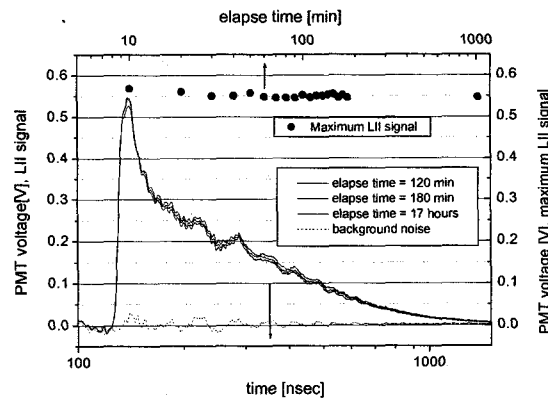


Fig. 5 Transient behavior of signal and reproductivity for atomizing time (Q_{ato}=1500cc/min, Q_{dil}=0, D_p=25nm)

질소만의 신호 그리고 이소프로필알코올의 신호를 보여준다. 신호의 초기의 경향(25ns이내)을 보면 알 수 있듯이 이소프로필알코올의 산란 신호의 영향이 큼을 알 수 있다. 이는 LII 신호를 가지고 매연의 질량유량 측정 시 초기의 신호를 사용할 수 없음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 50nsec 이상의 신호를 사용하여 신호를 처리하였다. 50nsec 이상에서는 그림에서 알 수 있듯이 질소의 노이즈신호만 제거하면 깨끗한 신호를 얻을 수 있다. 50ns 이후의 LII 신호의 감소율을 구해보면 하나의 시상수를 갖고 감소함을 알 수 있다. 이는 가열된 매연 입자의 식는 과정이 50nsec 이후에는 하나의 지배적인 과정(path), 즉 주위로의 전도에 의한 열손실에 의해 이루어짐을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 19nm 카본 입자의 LII 신호감소에 대한 시상수는 0.00785 [1/nsec]이다.

다음은 분무의 변동과 레이저 세기의 변동에 따른 영향을 파악하기 위해 장시간동안 신호의 강도와 각 순간의 신호의 변화를 비교해보았다. Fig. 5는 시간에 따른 신호의 변화를 보여준다. LII 신호는 그림에서 알 수 있듯이 3시간 동안 재현성 있는 결과(<2%)를 나타냈고, 신호의 감소율 또한 타당한 오차범위 내(<0.5nm)에서 재현성을 가졌다.

다음은 분무유량을 고정하고 희석에 의한 질량유량의 변화를 검증하였다. Fig. 6은 희석유량을 증가시켰을 때 이론적인 변화와 실제 얻어진 결과를 보여준다. 최대 LII 신호를 기준으로 했을 때는 알코올 액적의 산란 신호에 의한 영향에 의해 이론적인 변화와 큰 차이를 보인다. 그러나 산란 신호의 영향이

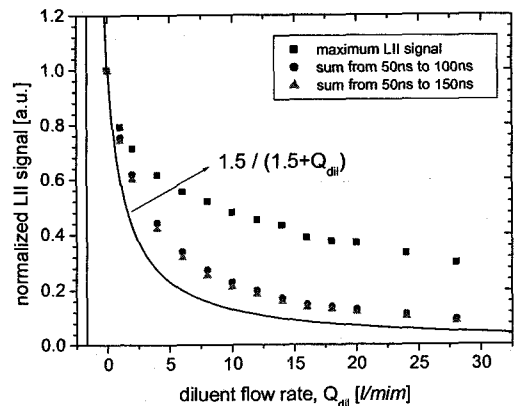


Fig. 6 The change of LII signal according to dilution rate (Q_{ato}=1500cc/min, D_p=25nm)

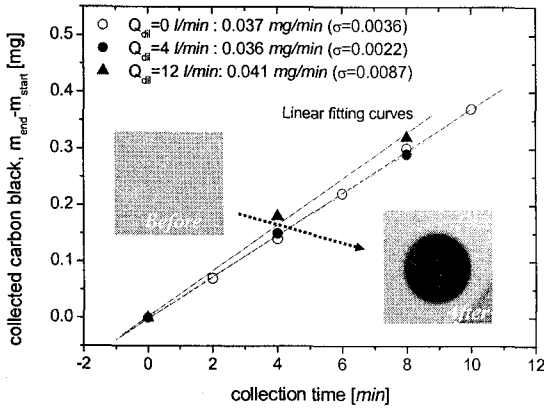


Fig. 7 The weight of collected carbon black particles according to sampling time ($Q_{aito}=2000\text{cc}/\text{min}$, $D_p=25\text{nm}$)

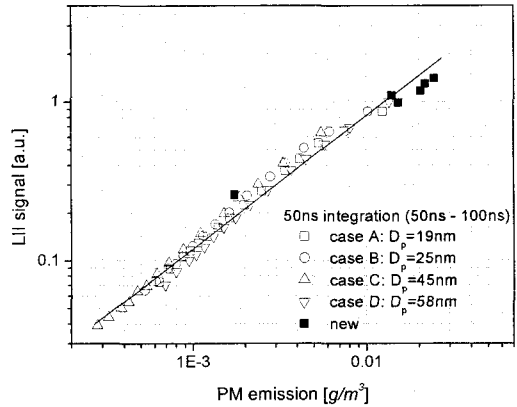


Fig. 9 The calibration curve of LII signal to the soot emission

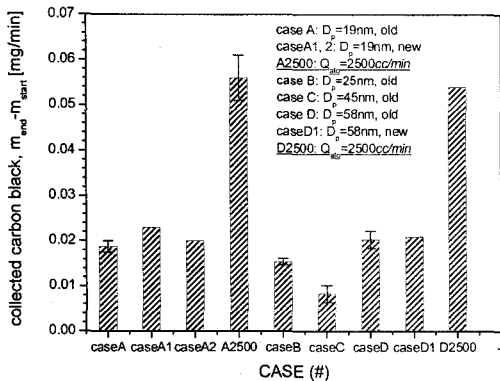


Fig. 8 The weight of collecting particles a minute in all experimental cases

없는 50ns 이상의 신호를 사용했을 때(50ns-100ns 적분)는 이론적인 변화와 유사한 결과를 보임을 알 수 있고, 이 결과를 바탕으로 본 실험에서는 입자의 질량유량(soot emission)을 변화시켜 주었다.

카본입자의 질량유량 측정을 위해 계측부 후단에 매연 필터를 부착하여 필터에 포집된 카본입자의 무게를 측정하였다. 분당 포집되는 카본입자의 무게는 0.03mg 정도로 작기 때문에 포집시간을 늘림으로써 오차를 최소화 하였다. 그러나 오차를 줄이기 위해서 포집시간을 크게 하는 것이 좋지만 입자가 포집될수록 필터의 공극이 막히기 때문에 정상적인 유동을 확보할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 적절한 포

집시간의 선택을 위해 포집 시간을 2분에서 10분까지 변화시켜 측정하였다. 필터에 포집된 카본입자의 사진과 본 실험의 포집시간에 다른 포집양은 Fig. 7 과 같다. 필터에 포집된 양은 매연 량에 관계없이 각 경우 포집시간에 선형적인 변화를 보임을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 10분의 포집시간을 이용함으로써 무게 측정 시 오차를 최소화 하였다.

3. 실험 결과

3.1 TIRE-LII 신호의 보정

LII 신호의 보정을 위해 case A(19nm), B(25nm), C(45nm), D(58nm)에 대해 분당 포집된 카본 입자의 무게를 측정하였다. Fig. 8은 분당 포집된 카본입자의 양을 보여준다. 밀줄 친 조건은 분무유량이 2500cc/min인 경우로 카본 입자의 질량유량을 늘린 경우이다. 포집된 카본 입자의 양은 분당 0.0083mg/min-0.056mg/min의 범위를 보이고 있다. 따라서 식 (1)에 의해 본 실험에서 매연량의 보정 범위는 $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ - $37\text{mg}/\text{m}^3$ 정도로 엔진 배기단의 매연 농도계측에 적당히 범위임을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 위에서 측정된 카본 입자의 포집양을 바탕으로 보정된 LII 신호의 세기를 나타낸다. 여기서 LII 신호는 50nsec에서 100nsec의 신호의 부분을 적분한 세기를 사용하였다. 대부분의 영역에서 LII 신호는 매연의 입경에 관계없이 매연의 질량유량의 변화에 대해 선형적인 모습을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 각 경우에 대해서 분무유량($Q_{aito}=1500\text{cc}/\text{min}$)

을 고정하고 회석율(Q_{dl})을 변화시키면서 측정된 LII 신호이다. 각각의 경우에서 회석 유량을 증가시키에 따라 신호 세기의 감소를 볼 수 있지만 각 경우에 대

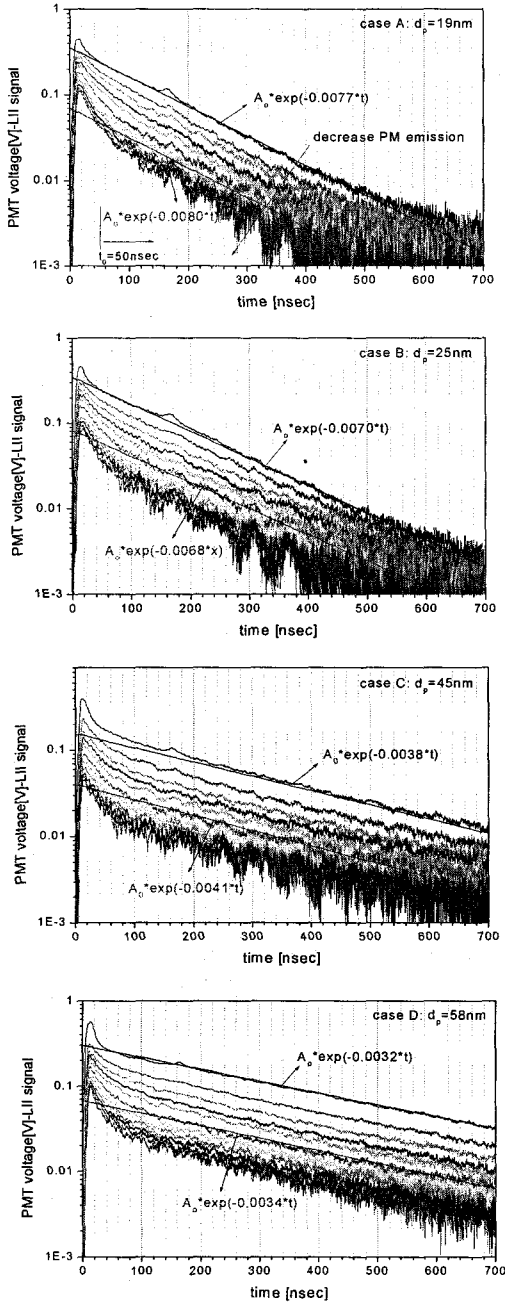


Fig. 10 Time resolved LII signal according to primary particle diameter and soot emission

해서 신호의 감소율은 타당한 오차범위(<6.5%~<2.5nm)에서 일정한 모습을 보임을 알 수 있다. 입자의 입경이 감소함에 따라 입자의 냉각이 빠르게 일어나기 때문에 감소율이 커짐을 알 수 있고, 직경의 변화에 따른 감소율의 변화는 Fig. 11에 나타났다.

3.2 LII 모델 시뮬레이션과의 비교를 통한 보정 LII 신호의 감소율은 앞에서 언급하였듯이 주위의 열전달에 의해 지배되기 때문에 주위 가스의 온도에 따라 변화한다. 주위 가스의 온도가 감소하면 감소율은 증가하는 경향을 보이고 따라서 운전 조건에 따른 매연 입자의 입경 측정을 위해서는 배기가스의 온도측정과 더불어 감소율에 대한 온도 보정이 필수적이다. 따라서 상온의

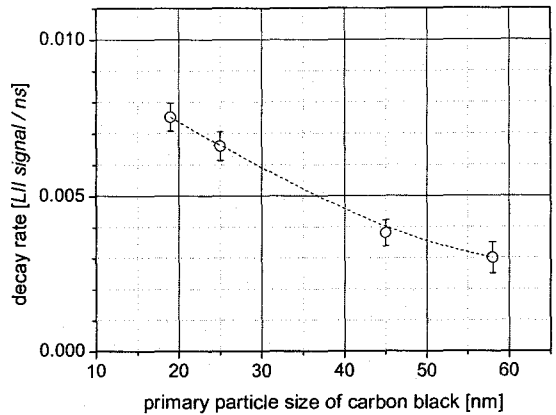


Fig. 11 The decay rate of signal according to primary particle diameter

Table 1 Parameters for numerical calculation

Notation	Parameter	Values used	Unit	Reference	Remark
I	Laser irradiance	Uniform (r) Triangle (t)	W/m^2		Gaussian (r) (Bladh, 2003)
ρ_s	Density of soot	$2.26 \cdot 10^3$	Kg/m^3	Melton(1984)	$1.86 \cdot 10^3$ (Megardis, 1988) $2.1 \cdot 10^3$ (Wainner, 1999)
ΔH_s	Heat of vaporization of soot	$7.78 \cdot 10^8$	$J/Kmol$	Wilk(2000)	Curve fitting (Bladh, 2003)
M_s	Molecular weight of soot vapor	24 (C_2 molecule)	$Kg/Kmol$	Wainner(1999) Melton(1984)	Curve fitting (Bladh, 2003)
c_s	Specific heat of soot	$2.05 \cdot 10^3$	$J/Kg \cdot K$	Wainner(1999)	$1.9 \cdot 10^3$ (Melton, 1984) $2.1 \cdot 10^3$ (Bladh, 2003)
m_g	Molecular weight of ambient gas	28	$Kg/Kmol$		N_2 molecule
α	Thermal accommodation coefficient	0.26		Leroy(1997)	0.9 (Wainner, 1999)
β	Evaporation coefficient	0.8		Wainner(1999)	
T^*	Sublimation temperature	3930	K	Wilk(2000)	4000(Roth, 1996)
γ	Ratio of specific heat	1.4			
Γ	Diffusion coefficient of soot vapor	$D_{s,v}(T/T_s)^{1.75}$	m^2/sec		
D_s	Diffusivity at T_s	$1.5 \cdot 10^{-5}$	m^2/sec	Kannury	

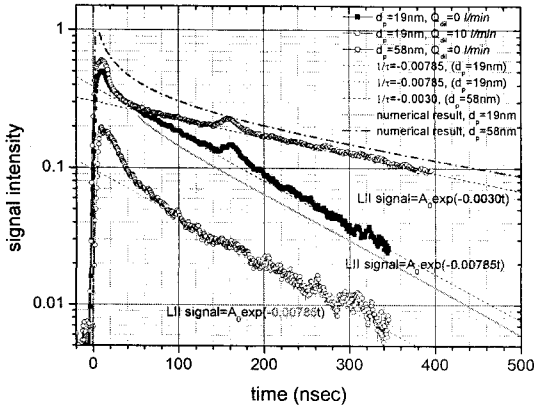


Fig. 12 The comparison between experimental and numerical results in case A(19nm) and D(58nm)

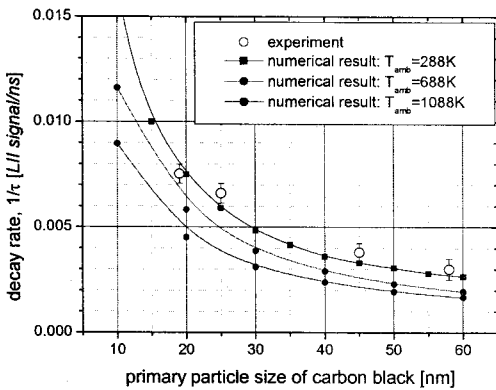


Fig. 13 The comparison between experimental and numerical results

카본 블랙의 LII 신호를 기본으로 수치적 계산을 튜닝하고 이렇게 튜닝 된 계산 프로그램을 이용하여 온도의 영향을 보정하였다.

기본적인 데이터로 입경이 작은 case A(19nm)와 제일 큰 case D(58nm)의 결과를 사용하였고 계산은 Melton⁽¹⁴⁾와 Wainner⁽¹⁵⁾의 계산을 기반으로 작성되었다. 그 때에 쓰인 변수는 Table 1에 제시하였다.

Fig. 12는 실험 결과와 계산의 결과를 비교한 그림이다. 수치적 결과의 감소율은 19nm와 58nm의 LII 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 13은 입경에 따른 감소율의 변화에 대한 수치

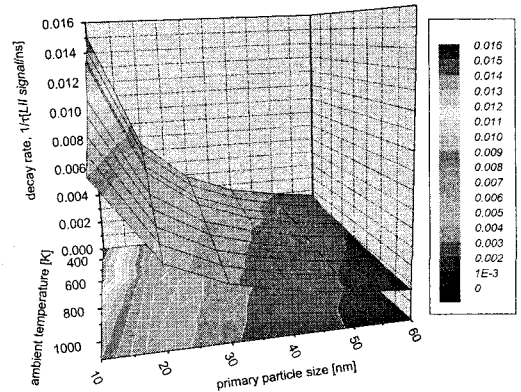


Fig. 14 The final calibration curve for correction of exhaust temperature variation

적 계산결과와 실험결과를 비교한 것이다. 실험의 오차범위 내에서 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 작은 직경에서는 감소율의 변화가 뚜렷한 반면에 큰 직경(45nm와 58nm)에서는 감소율의 변화가 둔감함을 알 수 있고 이는 입자 측정 시 충분히 고려되어야 할 사항이다. 그리고 주위의 온도가 400°C, 800°C일 때 입경에 따른 LII 신호의 감소율 변화를 보면 작은 입경에서는 400°C의 변화에 대해 감소율의 변화는 상온에서 5nm 정도의 변화를 보이고 큰 입경의 범위에서는 10nm의 변화를 보인다. 그리고 주위온도의 변화 또한 큰 입경에서 감소율의 변화를 둔감하게 하는 경향이 있음을 알 수 있다. 따라서 큰 입경의 측정시 많은 주의를 기울일 필요가 있다. Fig. 14은 주위의 온도와 매연 입경(primary particle size)의 변화에 따른 감소율의 변화를 나타낸다. 이렇게 얻어진 보정 맵(map)을 이용하여 엔진의 운전 조건에 따른 매연 배출특성에 대한 연구가 정상운전 조건뿐만 아니라 시간적인 변동이 있는 운전조건에서 현재 수행중이다.

4. 결론

엔진 배기단에서 LII 방법을 이용하여 매연의 배출 특성을 살펴보기 위한 신호의 보정 방법에 대하여 살펴보았다. 신호의 보정을 위해 다양한 입자 크기의 카본 입자를 이용하여 상온에서 실험을 수행하였고 이를 바탕으로 LII 과정에 대한 수치 계산을 검증하여 온도에 대한 영향을 고려

할 수 있었다. 현재의 연구에서 입자 직경에 대해서는 19nm-58nm 범위 그리고 매연량에 대해서는 0.25mg/m^3 - 37mg/m^3 의 범위 내에서 실험적인 보정이 이루어졌다. 이를 바탕으로 엔진 운전 조건에 따른 매연의 배출 특성에 관한 연구가 진행 중에 있다.

(1) 초기의 LII 신호는 탄성산란의 영향이 크기 때문에 보정 시에 주의가 필요하다. 특히, LII 신호의 필터 선택 시 입사 레이저 파장에서 투과율과 신호의 세기에 관한 검증이 필수적이다. 본 연구에서는 탄성 산란 신호를 배제하기 위해 50nsec-100nsec 사이의 신호를 적분하여 사용함으로써 신호의 재현성을 높일 수 있었다.

(2) 매연 입자의 배출량에 대해서 LII 신호의 세기는 입자 크기에 관계없이 선형적인 변화를 보인다.

(3) 카본 입자의 직경이 증가함에 따라 LII 신호의 감소율은 감소하고 45nm 이상의 비교적 큰 입경에서는 체적에 대한 비 표면적의 차이가 감소함으로써 감소율의 변화가 둔감함을 알 수 있다.

(4) 엔진 배기단의 매연 배출 특성을 측정하기 위해서 입자의 직경과 배기가스 온도에 대한 LII 신호의 감소율의 맵(mab)을 실험적, 수치적 방법을 통해 얻었었고 실제 엔진에 적용 중이다.

참고문헌

- (1) GRPE - PMP, 2001, "Health Effects, Measurement and Filtration of Solid Particles Emitted from Diesel Engine."
- (2) Dobbins, R.A., 2002, "Soot Inception Temperature and Carbonization Rate of Precursor Particles," *Combustion and Flame*, Vol. 130, pp. 204~214.
- (3) Oh, K. C., Lee, U. D., Lee, E. J. and Shin, H. D., 2005, "The Evolution of Incipient Soot Particles in Ethane Inverse Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 140, pp. 249~254.
- (4) Vander Wal, R. L., Ticich, T. M. and Stephens, A. B., 1999, "Can Soot Primary Particle Size be Determined Using Laser-Induced Incandescence?," *Combustion and Flame*, Vol. 116, pp. 291~296.
- (5) Will, S., Schraml, S. and Leipertz, A., 1998, "Performance Characteristics of Soot Primary Particle Size Measurements by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence," *Applied optics*, Vol. 37, No. 24, pp. 5647~5658.
- (6) Roth, P. and Filippov, A. V., 1996, "In Situ Ultrafine Particle Sizing by a Combination of Pulsed Laser Heatup and Particle Thermal Emission," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, No. 1, pp. 95~104.
- (7) Schraml, S., Dankers, S., Bader, K., Will, S. and Leipertz, A., 2000, "Soot Temperature Measurements and Implications for Time-Resolved Laser-Induced Incandescence (TIRE-LII)," *Combustion and Flame*, Vol. 120, pp. 439~450.
- (8) Oh, K. C., 2005, "An Experimental Study of Soot Formation and Growth of Incipient Soot Particles in Coaxial Diffusion Flames," Doctoral thesis, KAIST.
- (9) Lahaye, J. and Prado, G., 1981, "Morphology and Internal Structure of Soot and Carbon Blacks, in Particle Carbon," ed, Siegl, D. and Smith, G., *Plenum press*, New York, pp. 33~55.
- (10) Rivin, D. and Medalia, A. I., 1983, "A Comparative Study of Soot and Carbon Black, in Soot in Combustion System and Its Toxic Properties," ed, Lahaye, J. and Prado, G., *Plenum press*, New York, pp. 25~40.
- (11) Ni, T., Pinson, J. A., Gupta, S. and Santoro, R. J., 1995, "Two Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction By The Use of Laser-Induced Incandescence," *Applied optics*, Vol. 34, No. 30, pp. 7083~7091.
- (12) Quay, B., Lee, T. W., Ni, T. and Santoro, R. J., 1994, "Spartially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using Laser-Induced Incandescence," *Combustion and Flame*, Vol. 97, pp. 384~392
- (13) Oh, K. C. and Shin, H. D., "The Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Concentration on Soot Formation in Non-Premixed Flames," *Fuel*, to be published.
- (14) Melton, L. A., 1984, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied optics*, Vol. 23, No. 13, pp. 2201~2208.
- (15) Wainner, R. T., 1999, "An Analytical and Quantitative Analysis of the Laser Induced Incandescence of Soot," *Doctorial thesis, Georgia institute of technology*.
- (16) Leroy, O., Perrin, J., Jolly, J., Pealat, M. and

Lefebvre, M., 1997, "Thermal Accommodation of a Gas on a Surface and Heat Transfer in Cvd and Pecvd Experiments," *J. Phys D: appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 499~509.

(17) Snelling, D. R., Liu, F., Smallwood, G. J. and

Gulder, O. L., 2004, "Determination of the Soot Absorption Function and Thermal Accommodation Coefficient Using Low-Fluence Lii in a Laminar Coflow Ethylene Diffusion Flame," *Combustion and Flame*, Vol. 136, pp. 180~190.