

< 논문 >

나노크기의 매연입자에 대한 LII의 열-물질 전달 모델에 관한 수치적 연구

김규보* · 심재영* · 장영준** · 전충환†
(2006년 12월 27일 접수, 2007년 6월 25일 심사완료)

A Numerical Study of Heat and Mass Transfer Model of LII for Nanoscale Soot Particles

Gyu Bo Kim, Jae Young Shim, Young June Chang and Chung Hwan Jeon

Key Words: Laser Induced Incandescence(레이저유도백열법), Primary Particle Size(일차입자크기), Soot Property(매연물성치), Decay Rate(감쇠율), Time Resolved(시분해)

Abstract

As increasing interest for soot emission, etc in combustion systems, various studies are being carried out for the reduction and measurement techniques of soot. Especially, laser induced incandescence is the useful measurement technique which has distinguished spatial and temporal resolution for primary particle size, volume fraction and aggregated particle size etc. Time resolved laser induced incandescence is the technique for measuring primary particle size that is decided to solve the signal decay rate which is related to the cooling behavior of heated particle by pulsed laser. The cooling behavior of heated particle is able to represent the heat and mass transfer model which are involved constants of soot property for surround gas temperature on the our previous work. In this study, it is applied to the time-dependence thermodynamic properties for soot temperature instead of constants of soot property for surround gas temperature and compared two different model results.

1. 서 론

연소시스템에서 배출되는 매연입자에 대한 관심이 증대되면서 매연입자의 저감기술과 측정기술에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 특히 측정기술의 경우는 저감기술 개발을 위해 선행되어야 할 것이며, 본 논문에서는 광학적 성질을 통해 입자에 대한 크기를 측정하는 기술에 대해 언급하고자 한다.

매연입자의 측정에는 레이저 감쇠/산란법(Laser Extinction/Scattering method: LES), 레이저 유도 백열법(Laser Induced Incandescence : LII) 등의 비접촉 방법이 사용된다.

레이저 유도 백열법은 레이저 조사로 적열된 작은 입자들의 열복사를 해석하는데 기초를 두고 있으며 시, 공간 분해능이 우수한, 실시간 매연의 체적 분율과 입자크기 측정이 가능한 기법으로 높은 주목을 받고 있다. 입자의 크기는 LII 신호 감쇠비에 의존한다고 알려져 있으며^(1,2) 이는 시간의 경과에 따른 입자의 냉각거동을 조사하면 입자크기를 결정할 수 있다는 것을 의미한다. 이를 시분해 레이저 유도 백열법(Time Resolved LII; TIRE-LII)라고 하여, 레이저 조사로 적열된 매연 입자들의 열전달 메커니즘을 해석하는데 기

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

E-mail : chjeon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3051 FAX : (051)582-9818

* 부산대학교 기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

Table 1 Nomenclatures

c_1	First constant in Plank's formula	[W m ²]
c_2	Second constant in Plank's formula	[K m]
c_s	Specipic heat of soot	[J/kg K]
d_p	Primary particle size	[nm]
G	Heat transfer geometry factor	
h	Heat transfer coefficient	[W/m K]
I_L	Laser fluence	[J/m ²]
k_∞	Thermal conductivity	[W/m K]
Kn	Knudsen number	-
m_p	Mass of a single of soot particle	[g]
n_∞	Refractive index of surrounding gas	-
p^*	Vaporization pressure of soot	[N m ⁻²]
q_{rad}	Radiation energy	[W m ⁻²]
R	Specific gas constant	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
R_m	Universal gas constant	8.3144
$r(t)$	Soot particle radius	[m]
S_{LII}	LII signal	[J]
a_{abs}	Absorption coefficient	-
T	Soot particle temperature	[K]
T_∞	Surrounding temperature	[K]
T^*	Vaporization temperature of soot	[K]
W_v	Molecular weight of soot	[kg mol ⁻¹]
λ	Detection wave length	[m]
λ_o	Absorption wave length	[m]
λ_{mfp}	Mean free path of vaporized particle in gas	[m]
ρ_v	Density of vaporized soot	[g m ⁻³]
ρ_s	Density of soot	[kg m ⁻³]
ΔH	Enthalpy of vaporization	[J mol ⁻¹]

초를 두고 있다.

레이저 유도 백열법에 관한 연구는 Eckbreth (1977)⁽³⁾에 의해 매연이 있는 화염에서 라만 산란 신호를 방해하는 매연입자의 배경광도의 관찰로부터 처음 밝혀졌으며 이후 Melton⁽¹⁾과 Dasch⁽⁴⁾에 의해 레이저세기(flucose)와 매연입자 크기의 함수로서 LII신호를 이론, 수치적으로 예측하였고, 매연 질량농도에 대한 LII의 비례성을 보였다. Melton모델의 확대로써 Hefeldt⁽⁵⁾는 어떻게 파장에 의존하는 물성치가 각각 다른 직경의 매연입자의 흡수 및 방출특성을 변경하는가를 해석함으로서 Melton 이론을 확장하였다. Quay 등⁽⁶⁾은 LII신호가 어떤 세기 이하에서는 레이저세기에 선형적이며, 어떤 세기 이상에서는 포화되고 거의 일정한 "plateau" 영역을

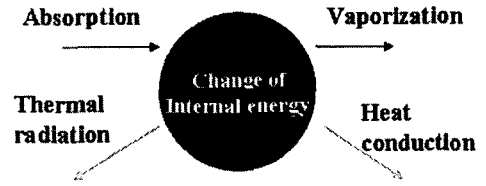


Fig. 1 Schematic representation of the power balance of a laser heated soot particle

나타냄을 보였으며, Ni 등⁽⁷⁾은 LII신호의 2차원 LII 측정기법을 확대하였다.

LII관련 매연의 입자크기 측정에 있어서 선행연구들을 살펴보면, LII 신호의 감쇠특성을 이용한 TIRE-LII에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 이는 특히 입자의 열전달 메커니즘을 수치적으로 모델링하여 실험에서의 LII 신호를 분석, 입자의 크기를 결정하게 된다. 선행연구⁽⁸⁾에서는 이러한 수치적 모델을 통해 입자의 크기를 실험에서 얻은 결과 값으로 나타내었으나 수치해석 상에서의 입자에 대한 물성치를 주위온도, 즉 화염온도에서의 물성치를 결정하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 입자가 레이저에 의해 적열되는 순간 약 4000K 정도로 가열된다고 하였을 때 입자의 물성치 또한 급격한 변화를 나타내게 될 것이고 이러한 결과는 입자의 냉각거동과 관계된 LII 신호를 분석하는데 오차를 발생시킬 것으로 사료된다. 본 연구에서는 입자의 물성치를 시간 변화에 대한 입자 온도의 함수로 표현하여 LII 신호 및 입자크기 등의 LII 특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았고, 선행결과와 비교 분석하였다.

2. 수학적 모델

2.1 에너지 평형 방정식

LII는 매연입자에 레이저를 조사시켜 약 4000K 까지 가열시키고 이후 입자가 방출하는 신호를 검출하여 매연 입자의 정보를 결정하는 것으로 일련의 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 LII의 모델은 입자의 에너지 및 질량 평형에 기초를 두는 것으로 레이저에 의해 입자가 가열되는 것을 흡수에너지로, 가열 후 입자의 냉각은 증발과 주위로의 전도, 에너지의 흑체복사로

이루어진다. 이러한 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{vap} - \dot{Q}_{con} - \dot{Q}_{rad} \quad (1)$$

각 항들을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

내부에너지의 경우는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dU}{dt} = m_p c_s \frac{dT}{dt} \quad (\text{where } m_p = \frac{4}{3} \pi r(t)^3 \rho_s) \quad (2)$$

여기서 c_s 와 ρ_s 는 입자온도 T 에 대한 열역학적 상태량으로 Fried and Howard⁽⁹⁾의 solid graphite로 적용한 관계식을 적용하였고 다음의 식 (3)과 (4) 같이 나타내었다.

$$c_s = \frac{R}{12.01} \times \left\{ 1.115 \left(\frac{597}{T} \right)^2 \exp \left(\frac{597}{T} \right) \left[\exp \left(\frac{597}{T} \right) - 1 \right]^{-2} + 1.789 \left(\frac{1739}{T} \right)^2 \exp \left(\frac{1739}{T} \right) \left[\exp \left(\frac{1739}{T} \right) - 1 \right]^{-2} + 1.16 \times 10^{-4} T \right\} \quad (3)$$

$$\rho_s = 2.3031 - 7.3106 \times 10^{-5} T \quad (4)$$

식 (5)는 흡수에너지에 대해 나타낸 것이다.

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha_{abs}(r, \lambda_0) I_L(t, x) \pi r(t)^2 \quad (5)$$

where, $\alpha_{abs} = \begin{cases} \beta(m) & r > \delta \\ r/\delta & r < \delta \end{cases}$

흡수에너지는 적열면적과 여기파장에 따른 흡수계수 $\alpha_{abs}(r, \lambda)$ 로 나타내며, 여기서 $\beta(m)$ 은 구형입자의 프레넬 반사율(Fresnel reflectivity)을, δ 는 입자의 흡수길이변수로 입자의 직경에 상응하는 것으로 나타내며, 구형입자에 대한 Mie scattering 관련 모델에 의해 결정⁽¹⁾되어진다.

$$\dot{Q}_{vap} = - \frac{\Delta H_v(T)}{W_v} \frac{dm_p}{dt} \quad (6)$$

식 (6)은 증발에너지를 나타내는 것으로 입자의 질량변화에 따르며, $\Delta H_v(T)$ 와 W_v 는 증발엔탈피와 몰 질량으로 입자의 온도에 따른 열역학적 물성치로 적용하였다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{Q}_{con} = 4\pi r(t)^2 h \frac{(T - T_\infty)}{r(t)} \quad (7)$$

$$h = \frac{k_\infty}{1 + GK_n} \quad (\text{where, } Kn = \frac{\lambda_{mfp}}{2r(t)}) \quad (8)$$

식 (7)은 전도에너지를 나타내는 것으로 입자의 면적과 주위 온도와의 차이, 열전달계수 h 로 나타내었으며, G 와 Kn 는 Snelling 등⁽¹¹⁾이 계산한 열전달 계수를 사용하였으며, k_∞ 와 λ_{mfp} 는 Sutherland 근사⁽¹²⁾에 의해 결정되어진다.

$$\dot{Q}_{rad} = 4\pi r(t)^2 \dot{q}_{rad}(T, r) \quad (9)$$

$$\dot{q}_{rad}(T, r) = \int_0^\infty \alpha_{abs}(r, \lambda) \frac{c_1 n_\infty^2}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda \quad (10)$$

식 (9)는 복사에너지를 나타내는 것으로 방사계수 $\dot{q}_{rad}(T, r)$ 은 흡수계수와 동일하다는 가정⁽¹²⁾ 하에서 적분하여 계산되어진다.

식 (2)-(10)을 정리하면, 다음과 같이 시간에 따른 입자의 온도 변화를 나타내는 식으로 표현된다.

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{3\dot{q}_{rad}(T, r)}{r\rho_s c_s} - \frac{3(T - T_\infty)k_\infty}{[1 + \frac{G\lambda_{mfp}}{2r(t)}]r(t)^2 \rho_s c_s} + \frac{3\alpha_{abs}(r, \lambda_0) I_L(t, x)}{4r(t)\rho_s c_s} + \frac{3\Delta H_v(T)\dot{r}}{W_v r(t)c_s} \quad (11)$$

2.2 질량평형방정식

질량 평형 방정식은 다음의 식 (12)와 같이 나타내었다.⁽¹²⁾

$$- \rho_s \frac{dr}{dt} = \rho_v U_v \quad (12)$$

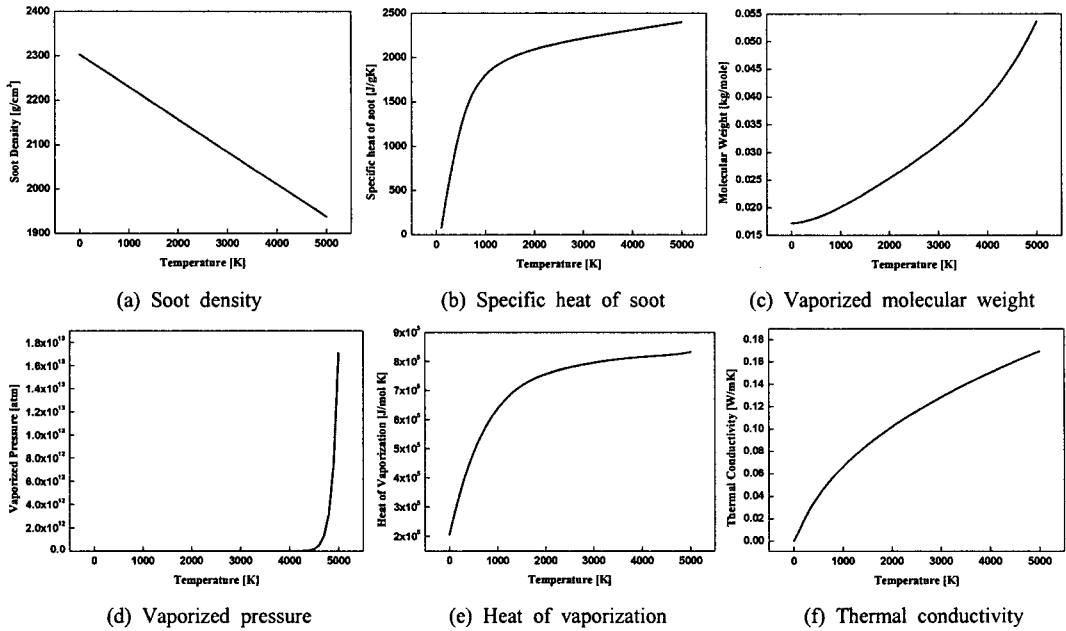


Fig. 2 Thermodynamic properties of soot as soot temperature distributions

$$U_v = \sqrt{\frac{R_m T}{2 W_v}} \quad (13)$$

$$\rho_v = \frac{p_v W_v}{R_m T} \quad (14)$$

$$p_v = p^* \exp\left[\frac{\Delta H_v(T)(T - T^*)}{R_m T T^*}\right] \quad (15)$$

$$S_{LII} \propto r^2 \int R(\lambda) \alpha_{abs}(r, \lambda) \frac{c_1 n_\infty^2}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} d\lambda \quad (17)$$

$R(\lambda)$ 은 광학 시스템의 전송과 검출기의 스펙트럼의 민감도에 대한 복합적인 함수이다. 본 연구에서는 단일 검출 파장을 사용하였기에, 상대적으로 나타내게 되는 S_{LII} 를 구하는 식 (17)에 있어서 $R(\lambda)$ 은 생략 가능하다.⁽¹⁰⁾

여기서 ρ_v 는 증기화된 입자의 밀도로 이상기체 상태방정식을 통해 얻을 수 있으며, Clausius-Clapeyron 방정식에 의해 증기압력(p_v)이 계산되어진다. 또한 U_v 는 Langmuir 증발율로 온도와 물질량의 함수이며, 입자와 증기의 온도는 같다고 가정하였다.⁽³⁾

앞에 언급한 식들에 의해 시간에 따른 입자의 크기 변화를 나타내는 식으로 표현되며, 다음과 같다.

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{p^*}{\rho_s} \sqrt{\frac{W_v}{2R_m T}} \exp\left[\frac{\Delta H_v(T)(T - T^*)}{R_m T T^*}\right] \quad (16)$$

2.3 LII 신호

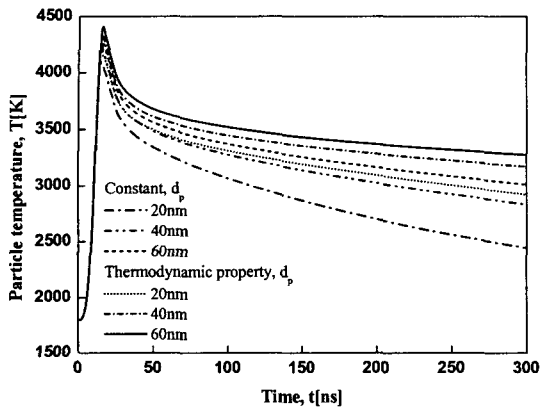
LII 신호의 계산은 직접적으로 입자의 온도와 반지름을 통하여 구할 수 있으며 그 식은 Will 등⁽¹⁵⁾에 의해 아래와 같이 제안되었다.

3. 결과 및 고찰

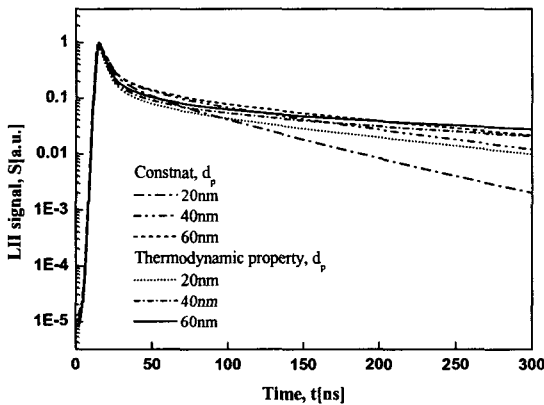
3.1 입자온도에 대한 물성치 특성

Fig. 2에 매연입자에 대한 물성치를 입자온도의 함수로 해석하여 그 결과를 나타내었다. (a)~(e)까지는 각각 solid 상태에서의 입자밀도분포와 비열분포, 증발입자 물 질량, 증발압력, 증발엔탈피를 입자 온도 값에 대해 나타낸 것이며 (f)의 경우는 주위가스의 온도에 대한 열전도 계수 값을 나타낸 것이다.

증발입자 물 질량, 증발엔탈피, 증발압력은 $W_v = \sum_{i=0}^5 w_i T^i$, $\Delta H = \sum_{i=0}^5 h_i T^i$, $P_v = \exp(\sum_{i=0}^5 p_i T^i)$ 로 각각 나타낼 수 있으며 각 항에 적용된 값들은 Small-



(a)



(b)

Fig. 3 Effect of soot property on (a) soot temperature characteristics and (b) cooling behavior of LII signal

wood 등의 연구결과를 참고하였다.⁽¹³⁾

레이저에 의해 가열된 입자는 약 4000K 정도의 높은 온도에서 냉각되어지게 되는데 이때의 온도를 고려하여 입자온도 조건에 맞는 열역학적 물성치를 적용하는 것이 화염에서의 입자온도를 고려하였을 경우보다 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

각각 물성치의 결과에서 살펴보면 화염온도를 1800K로 가정하였을 경우 입자가 가열되는 4000K 범위 내에서의 값들이 비교적 큰 차이를 나타내는 것으로, 화염온도에서의 입자 물성치를 고려하였을 경우와 구별되는 결과가 나타날 것으로 사료된다.

증발압력의 경우는 입자의 적열범위에서 크게 변화를 나타내지 않고 있으며, 입자의 밀도, 비

열비나 증발엔탈피 값에 있어서는 화염온도와 입자의 적열온도 조건에 대한 값이 10% 정도 차이가 발생하는 것을 볼 수 있고, 물 질량의 경우는 그 차이가 매우 크게 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 열전도 계수의 값은 주위가스의 온도에 의해 결정되므로 입자의 물성치와 관계없이 주위가스 온도가 결정되면 상수와 같은 역할을 하게 되므로 크게 입자의 온도에 따른 결과에 영향을 주는 요소가 되지 못하지만 주위가스 온도에 의해 그 값의 차이가 큼에 따라 주위가스 온도의 정확한 측정이 중요하다 할 수 있으며, 이는 선행연구에서도 언급한 바 있다.⁽¹⁴⁾

3.2 LII 신호 및 입자온도분포 특성

Fig. 3에 는 매연 입자에 대한 열역학적 물성치를 입자온도함수로 적용하였을 경우와 주위온도에 대한 입자 물성치를 상수로 적용하였을 경우에 대한 LII 신호와 입자온도분포를 비교하여 나타낸 결과이다.

반치폭(Full Width at Half Maximum ; FWHM) 10ns, 가우시안 분포, 레이저 세기 0.14 J/cm², T_∞ =1800K 조건에서 r=20, 40, 60nm에 대한 입자온도와 LII 신호 특성을 수치해석을 통해 나타내었다.

Fig.3(a)는 시간에 따른 입자크기별 온도변화를 나타내는 것으로 레이저 조사 후 모든 입자크기에 대해 증발온도(3915K)^(1,12)보다 높게 가열시키는 것을 확인할 수 있으며 입자크기와 관계없이 최고 온도가 어느 정도 제한되는 것을 발견할 수 있다. 이는 입자의 크기가 커지게 되면 흡수계수가 일정한 값을 가지게 되므로⁽¹⁾ 최고온도의 변화에 큰 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 또한 입자가 클 경우 동일한 시간에서 더 높은 온도를 유지하는데 이는 크기에 따른 열용량(heat capacity)의 차이에 의한 것으로 입자가 클수록 천천히 냉각되기 때문이다.

입자의 물성치를 상수로 적용했을 경우와 입자의 온도를 고려한 경우에 있어서, 후자의 경우가 더 높은 온도분포를 가지는 것을 확인할 수 있는데 이는 입자의 온도에 따른 물성치가 화염온도에서의 물성치보다 높은 온도에서의 물성치를 가짐으로써 더 효과적으로 입자의 온도특성을 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 3(b)는 시간에 따른 LII 신호특성을 나타낸 결과로 입자의 적열 온도에 대한 열역학적 상

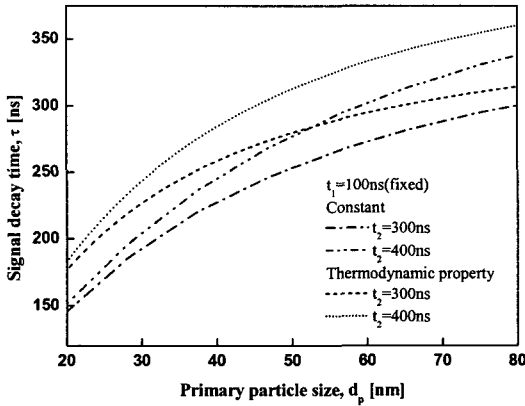


Fig. 4 Signal decay time as function of primary particle size for two different conditions

태량을 적용하였을 경우와 주위가스 온도에서의 입자의 상태량을 상수로 취급하였을 경우를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에서의 결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 큰 입자일수록 LII 신호의 기울기가 완만해지는 것을 확인할 수 있으며 레이저 조사 후 약 100ns 이후에서는 LII 신호의 기울기가 거의 일정함을 관찰할 수 있다.

입자의 크기에 따른 LII 신호의 기울기 차이를 이용하여 LII 신호를 시간에 대한 지수함수로 나타내었을 때의 서로 다른 두 시간대에서의 신호기울기를 구함으로써 입자의 크기를 결정할 수 있는데 화염온도에 대한 상수를 적용하였을 경우에 대한 입자온도에 대한 열역학적 물성치를 적용한 결과에서는 초기 일정시점(약 100~200ns)까지는 전자의 경우가 높은 신호 값을 유지하지만 그 이후에는 입자의 크기가 커질수록 후자의 경우가 높은 신호 값을 유지하는 것을 관찰할 수 있다.

이는 두 모델에 있어서 동일한 LII 신호로 입자의 크기를 결정하고자 할 때 신호기울기 값의 차이가 명확히 존재한다는 것을 알 수 있다.

이것은 결과적으로 모델이 얼마나 정확하게 수행되느냐에 따라 입자의 냉각거동을 통한 입자크기 결정에 큰 영향을 준다는 것을 의미하는 것으로 모델과 실험의 교정과정이 반드시 필요하다 하겠다.

3.3 LII 신호 감쇠율

3.2절에서 언급한 것과 같이 LII 신호 기울기의 차이가 동일한 입자크기에서 발생하는 것을 확인하였고 신호의 기울기 값의 차이가 얼마나 나타

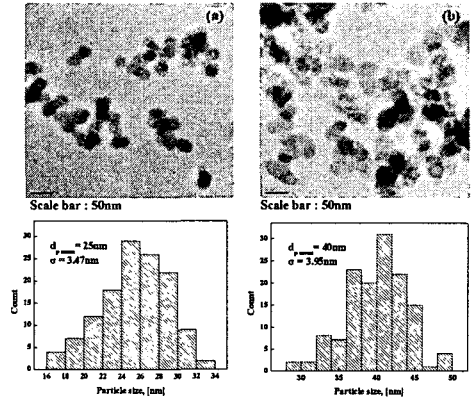


Fig. 5 TEM micrographs via thermophoretic sampling at (a) HAB=15mm, (b) HAB=20mm

Table 2 Comparison of mean particle size in TEM images with primary particle size in previous model and modified model

Items	Unit	Results	
Flame hight above burner tip (HAB)	mm	15	20
d _{p,mean} , TEM image	nm	25	40
d _p , Previous work	nm	50	60
d _p , Modified model	nm	38	45

나는 가를 살펴보기 위해 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 감쇠율(τ)로 표현하였다.

Fig. 4는 LII 신호에서 일정시간(t₁=100ns, t₂=300, 400ns)에서의 감쇠율을 입자크기에 대한 함수로 다음과 같이 표현하여 나타낸 결과이다.

$$\frac{d}{dt} [\ln S(t)] \approx -\frac{C}{a} = -\frac{t_2 - t_1}{\tau(r)} \tag{18}$$

(11)과 (16)식으로부터 입자에 대한 LII 신호의 관계식을 위와 같이 근사하여 나타낼 수 있으며⁽¹⁶⁾ 신호의 기울기는 입자반경에 반비례함을 알 수 있다. 여기서 C는 입자의 물성치를 상수로 취급하여 근사한 것이다. 결과에서 보면 입자의 크기가 커질수록 신호 감쇠율이 증가하는 것을 볼 수 있으며 두 모델조건에서 t₂가 늦어질수록 신호의 감쇠율이 입자가 커질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 입자 물성치를 상수를 사용하였을 경우보다 열역학적 상태량함수로 적용하였을 경우 감쇠율 값이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이

러한 차이는 에너지 평형 방정식에 있어서 입자의 상태량 변화에 의해 나타나는 것으로 사료된다.

선행연구결과⁽¹⁴⁾와 비교해 볼 때 입자의 온도를 고려한 열-물질전달 모델의 수정을 통해 t_2 가 400ns일 경우에 대해 결과를 살펴보면 다음과 같은 차이가 발생됨을 알 수 있다. TEM 이미지는 에틸렌 확산화염의 높이 15mm와 20mm에서 포집된 입자의 크기특성을 나타낸 것으로 각 지점에서의 평균일차입자크기($d_{p,mean}$)가 25nm와 40nm로 측정되었다. 동일한 각 지점에서 취득한 LII 신호에 대한 감쇠율(decay time, τ)과 두 모델에서의 결과와 비교하였다. 입자의 물성치를 상수로 적용하였을 경우 TEM 이미지를 통해서 얻은 HAB=15mm에서의 평균일차입자크기인 40nm의 결과보다 큰 60nm크기의 입자로 결정되어지지만 입자의 물성치를 입자온도에 대한 상태량함수로 적용한 수정된 모델의 경우에는 45nm 크기의 입자로 결정되는데 이는 TEM 이미지에서 얻은 평균일차입자크기의 40nm에 상당히 근접하는 것으로 확인할 수 있다. 또한 HAB=20mm에서 획득한 TEM 이미지 결과에서는 입자의 평균일차입자크기가 25nm로, 동일한 지점에서 취득한 LII 신호의 감쇠율에 대해 상수를 적용한 모델의 결과에서는 50nm 크기에 대한 값으로 나타났지만 수정된 모델의 경우 약 38nm 정도로 TEM 이미지를 통해 얻은 25nm에 상당히 근접하는 결과를 확인하였다. 하지만 입자의 크기가 작을 경우 차이가 아직까지 큰 것을 확인할 수 있는 것으로 더욱 정확한 결과를 도출하기 위한 모델의 수정이 필수적으로 요구된다고 할 수 있다. Fig. 5와 Table 2는 선행연구 결과를 다시 언급한 것으로 TEM 이미지에서의 평균일차입자크기와 두 모델 결과를 통한 입자의 크기를 비교하여 표로 나타낸 것이다.

4. 결론

매연 입자의 온도에 대한 열-물질 전달모델에 따른 레이저 유도 백열 특성에 대한 수치적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입자의 물성치를 상수로 적용한 경우와 입자의 온도함수로 적용한 경우에 있어서 상태량 변화에 대해 살펴보았다. 입자가 레이저에 의해

적열될 경우 4000K이상 가열되는 상태에서 온도에 따른 상태량 변화가 큼을 확인하였으며, 증발 압력을 제외하면 나머지 상태량의 변화는 크게 나타났다.

(2) 입자의 레이저 조사 후 온도분포와 LII 신호특성에서는 입자의 크기가 클수록 LII 신호의 기울기가 완만하게 나타났고 주위가스 온도에 대한 입자의 상태량을 상수로 적용한 경우보다 가열된 입자의 온도에 대한 상태량으로 나타낸 경우에서 냉각효과가 줄어들었다. 입자의 크기가 작은 경우에서 차이가 크게 나았으며, 입자의 온도분포는 열역학적 상태량을 적용한 경우가 다소 높은 분포를 나타냈다.

(3) LII 신호 감쇠율과 입자크기에 관계에서는 입자 크기가 증가할수록 감쇠율이 증가하였고 t_2 가 증가되면 감쇠율도 증가하였다. 또한 입자의 상태량을 상수로 적용하였을 경우보다 더 큰 감쇠율을 나타내었고 결과적으로 실험을 통해 얻어지는 동일한 감쇠율에 대해 입자의 크기가 더 줄어드는 결과를 얻었다.

이상의 결과를 통해 모델을 적용하여 입자의 크기를 결정하는 연구에 있어서 모델의 정확성과 신뢰성을 높일 필요성이 더욱 증대되며 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

이 연구는 산업자원부 지원의 "미래형 자동차 배기가스 제로화 기술개발"과제 및 "2단계 BK21 사업"의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Melton, L. A., 1984, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol. 23, No. 13, pp. 2201~2208.
- (2) Roth, P. and Filippov, A. V., 1996, "In Situ Untrafine Particle Sizing by a Combination of Pulsed Laser Heatup and Particle Thermal Emission," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, pp. 95~104.
- (3) Eckbreth, A. C. 1977, "Effects of Laser Modulated Particle Incandescence on Raman Scattering Diagnostics," *J. Appl. Phys.*, Vol. 48,

- pp. 4473~4479.
- (4) Dasch, C. J., 1984, "Continuous-Wave Probe Laser Investigation of Laser Vaporization of Small Soot Particles in a flame," *Appl. Optics*, Vol. 23, pp. 2209~2215.
- (5) Hefeldt, L. D., 1993, "Real-Time Soot Concentration Measurement Technique for Engine Exhaust Streams," *SAE technical paper*, 930075.
- (6) Quey, B., Lee, T. W., Ni, T. and Santoro, R. J., 1994, "Spatially Resolved Measurements of Soot Volume Fraction Using LII," *Combust. and Flame*, Vol. 97, pp 384~392.
- (7) Ni, T., Pinson, J. A., Gupta, S. and Santora, R. J., 1995, "2-Dimensional Imaging of Soot Volume Fraction by the Use of LII," *Applied Optics*, Vol. 34, pp 7073~7091.
- (8) Lee, J. Ho., Kim, J. Y., Jeong, D. S., Jeon, C. H. and Chang, Y. J., 2005, "Numerical Investigation on Soot Primary Particle Size Using Time Resolved Laser Induced Incandescence (TIRE-LII)," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers*, B, Vol. 29, No. 9, pp. 1022~1031.
- (9) Fried, L. E., Howard, W. M., 2000, "Explicit Gibbs Free Energy Equation of State Applied to the Carbon Phase Diagram," *Physical Review*, B61, pp. 8734~8743.
- (10) Bladh, H., Bengtsson, P. E., 2004, "Characteristics of Laser-Induced Incandescence from Soot in Studies of a Time-Dependent Heat- and Mass-Transfer Model," *Applied Physics*, B 78, pp. 241~248.
- (11) Snelling, D. R., Liu, F., Smallwood, G. J. and Gülder, Ö. L., 2000, "Evaluation of the Nanoscale Heat and Mass Transfer Model of LII : Prediction of the Excitation Intensity," NHTC 2000-12132, Proceeding of the NHTC 2000, 34th National Heat Transfer Conference, Pittsburgh, PA.
- (12) Schittkowski, T., Mewes, B. and Brüggemann, D., 2002, "Laser-Induced Incandescence and Raman Measurements in Sooting Methane and Ethylene Flames," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 4, pp. 2063~2071.
- (13) Smallwood, G. J., Snelling, D. R., Liu, F. and Gülder, Ö. L., 2000, "Clouds Over Soot Evaporation : Errors in Modeling Laser-Induced Incandescence of soot," *Journal of Heat Transfer*, ASME, Vol. 123, pp.814~818.
- (14) Kim, G. B., Cho, S. W., Lee, J. H., Jeong, D. S., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2006, "Study on Soot Primary Particle Size Measurement in Ethylene Diffusion Flame by Time-Resolved Laser Induced Incandescence," *KSME B*, Vol. 30, No. 10, pp. 973~981.
- (15) Will, S., Schraml, S. and Leipertz, A., 1996, "Comprehensive Two-Dimensional Soot Diagnostics Based on Laser-Induced Incandescence (LII)," *Proc. Combust. Instit.*, Vol. 26, pp. 2277~2284.
- (16) Eom, G. S., Park, C. W., Shin, Y. H., Chung, K. H., Park, S., Choe, W. and Hahn, J. W., 2003, "Size Determination of Nanoparticles in Low-Pressure Plasma with Laser-Induced Incandescence Technique," *Appl. Phys. letters*, Vol. 83, No. 6, pp. 1261~1263.