

광 산란 기술을 이용한 연료 첨가제의 그을음 억제 효과 분석

서형석¹, 김기범^{2*}

¹중소조선연구원 해양IT융복합소재연구본부, ²충북대학교 기계공학부

Analysis of Effect of Fuel Additive on Soot Suppression Using Laser Scattering Technique

Hyoungeock Seo¹, Kibum Kim^{2*}

¹Ocean ICT & Advanced Materials Technology Research Division, RIMS

²Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

요약 본 논문에서는 이소 옥탄을 연료로 사용하는 증류 확산 화염에서 불완전 연소의 결과로 발생하는 그을음 입자의 성장 및 산화과정을 조사하였다. 또한, 철 연료첨가제의 그을음 발생 억제 효과를 평가하였다. 광 계측 기술을 이용하여 화염 안 그을음 입자의 탄성 산란 광을 화염의 높이에 따라 계측하고, 미광 보정 과정을 통하여 그을음 입자의 미분 산란 계수를 구하였다. 이 미분 산란 계수를 비교하여, 화염에서 그을음 입자의 성장 및 산화과정을 조사하였는데, 산화과정을 통하여 화염 내의 그을음 양이 감소하는 것을 관찰하였다. 철 연료 첨가제를 첨가한 화염에 대해서 동일한 연구 방법으로 구한 미분 산란 계수가 연료 첨가제가 첨가되지 않은 화염보다 더 작은 값을 보였다. 또한, 화염의 높이에 따라 반경방향으로 투과율을 측정하였는데, 연료 첨가제를 첨가한 연료의 화염은 투과율이 산화영역에서 약 5% 증가하는 것을 관찰하였고, 이는 미분 산란 계수와 동일한 경향을 보였다. 이것은 연료첨가제의 성분이 촉매 역할을 하여 그을음이 산화를 촉진해 화염 안의 그을음 양이 감소한 것으로 사료된다.

Abstract This paper presents an experimental analysis of the growth and oxidation processes of soot particles generated in an isooctane diffusive laminar flame due to incomplete combustion. The effects of iron-based diagnostics were employed to measure the elastic scattering light from soot particles in a flame at different flame heights, and the differential scattering coefficients were calculated through a calibration process. The growth and oxidation of soot particles in flame was investigated by comparing differential scattering coefficients, and the soot volume fraction was seen to decrease in the soot oxidation process. In the same manner, the differential scattering coefficients were calculated for iron-based fuel-additive seeded flame, and these coefficients were revealed to be smaller than those obtained in the fuel-additive unseeded flame. In addition, transmission through the radial direction of the flame was measured, and transmission in the soot oxidation regime was approximately 5% higher for the seeded flame. The propensity of the data coincided well with the differential scattering coefficients, and it can be concluded that the iron component of the fuel additive plays a crucial role as a catalyst, which eventually enhanced soot particle oxidation.

Keywords : Soot particle, Light scattering technique, Fuel additives, Transmission, Soot reduction

1. 서론

대기 중에 있는 미세 먼지, 매연 및 작은 액적 등을 미

소입자(PM)라고 하는데, 이런 입자들은 화석연료의 연소과정을 통해 배출되거나 다양한 화학반응에 의하여 공기 중에서 형성된다. 입자의 지름이 약 2.5 μm 이하인 입

본 논문은 2014학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Kibum Kim (Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-2446 email: kimkb11@chungbuk.ac.kr

Received May 16, 2016

Revised (1st June 22, 2016, 2nd July 1, 2016, 3rd July 6, 2016)

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

자들을 PM2.5라고 부르는데, 흡입 시 천식, 만성 기관지염, 호흡 곤란의 원인이 되며, 이 미소 입자는 크기가 너무 작아서 호흡기에 축적되어 심폐 질환 및 허혈성 심장 질환을 일으킨다. 또한, 자연환경에도 악영향을 미치는 데, 스모그 현상 및 산성비 등의 원인이 되어 생태계를 파괴한다.

미소 입자 중 그을음이 차지하는 비중이 매우 높는데, 이는 내연기관에서 화석연료의 불완전 연소로 인해 발생한다. 화석 연료의 연소과정을 적절히 통제하는 것이 그을음 발생을 줄이는 주요한 방법이지만, 다양한 운전 조건에서 매우 짧은 순간에 연료와 공기량을 적절히 혼합하여 완전연소를 실현하는 것은 매우 어렵다. 디젤 엔진에서 그을음 배출을 저감하기 위하여 HCCI 연소방식에 대한 많은 연구가 수행 중이며, 최근에는 후처리 장치(DPF)가 자동차에 필수로 부착되어 있다[1,2]. 이러한 기술들은 엔진에서 발생하는 그을음의 배출량에 대한 규제를 만족시킬 만큼 획기적으로 줄이고 있다. 또한 금속성 그을음 발생 억제제를 사용하여 연소과정에서 그을음의 발생을 저감하기도 한다[3,4]. 본질적으로 화석연료의 연소과정 중 화염에서 발생하는 그을음 입자의 형성과정을 이해할 필요가 있는데, 본 연구에서는 화염에서 발생하는 그을음 입자를 비파괴적인 방법인 레이저 광계측 기술을 사용하여 분석하였고, 그을음 억제제가 그을음 발생을 억제하는 영향에 대하여 조사하였다.

2. 이론

광 산란 기술은 레이저 분석법 중 하나인데, 확산화염에서 그을음 입자의 형성과정 및 산화과정을 측정 장치의 간섭 없이 조사할 수 있는 비파괴적인 분석 방법이다. 레이저 광과 같은 전자기파장은 입자와 몇 가지 방법으로 상호작용을 하는데, 입사광의 반사, 산란, 흡수, 방출 등이다. 이러한 물리적 현상은 입자의 모양, 재료(굴절률), 크기, 입자들 사이의 간격 등에 영향을 받는다. 따라서, 특정 시스템은 시스템 안에서 전자기파장이 입자와 간섭하는 방법을 이용하여 특성화할 수 있다. 즉, 입자의 크기, 수밀도, 부피분율 등의 정보는 산란 신호를 측정하여 산출할 수 있다.

탄성 광 산란 현상은 전자기파가 입자와 충돌했을 때, 입자의 전자가 입사파장과 동일한 파장으로 진동한다.

이 진동을 쌍극자 모멘트라하며, 입사광의 진동수와 산란광의 진동수가 같다. 탄성 산란에는 두 가지 종류가 있다. 하나는 Rayleigh 산란 이론인데, 아주 작고, 흡수가 없는 구형 입자에 적용할 수 있다. 다른 것은 Mie 산란 이론인데, 이는 입자의 크기에 제한 없이 일반적으로 구형 입자에 적용 가능하다. 그러나 Mie 산란이론의 복잡성 때문에 일반적으로 Rayleigh 산란 이론을 많이 사용한다.

산란입자의 크기는 무차원 매개변수로 다음과 같다[5].

$$\alpha = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (1)$$

여기서 a 는 입자의 반경이고, λ 는 상대파장으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{m_0} \quad (2)$$

식(2)에서 λ_0 는 진공상태에서 입사파장을 의미하고, m_0 은 주위 매질의 굴절률로 다음과 같다.

$$m = n + i\kappa \quad (3)$$

식(3)에서 n 은 빛의 일반적인 굴절률이고, 허수항의 κ 는 흡수를 의미한다. 상대적인 굴절계수는 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{m} = \frac{m}{m_0} \quad (4)$$

상대적인 굴절 계수의 크기는 다음과 같다.

$$|\bar{m}| = \frac{(n^2 + \kappa^2)^{1/2}}{m_0} \quad (5)$$

Rayleigh 영역에서, 수직-수직 미분 산란 단면적(cm^2/sr)은 식 (6)으로 정의 되는데, 이것은 산란면에 대해 입사광과 산란광 모두 수직으로 편광된 것을 의미한다.

$$\sigma_{VV} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \alpha^6 \left| \frac{\bar{m}^2 - 1}{\bar{m}^2 + 2} \right|^2 \quad (6)$$

식 (6)에서, 첫 번째 아래첨자는 입사광이고, 두 번째 아래첨자는 산란광을 의미한다. 또한 아래첨자 V 는 산란 면에 대해 수직 편광을 의미한다. 식 (6)에서 산란 단면적은 산란입자 크기의 6승에 비례하는 것을 알 수 있다. 산란 부피 안에 있는 수 많은 입자들에 의한 미분 산란 계수, $K'_{VV}(\text{cm}^{-1}\text{sr}^{-1})$ 는 미분 산란 단면적과 산란 부피 안의 입자의 수(N)의 곱으로 정의된다.

$$K'_{VV} = N\sigma'_{VV} \quad (7)$$

또한, 투과율은 시스템 안의 입자들을 투과한 빛의 세기 당 입사광의 세기로 묘사되며, 아래의 식과 같다.

$$\tau = \frac{I_{\text{transmitted}}}{I_o} \quad (8)$$

τ 가 1이면 100%의 입사광이 시스템의 입자들을 투과한 것이고, 0이면 입사광 전부가 흡수되거나 산란되어 소멸된 것이다.

3. 연구장치

3.1 버너 및 연료 공급 장치

확산 화염에서 생성되는 그을음 입자를 계측하기 위하여 Fig. 1에 보여 지는 것과 같은 버너를 제작하였다. 가스 상태로 증발된 이소옥탄과 질소가 버너의 내관을 통하여 공급되고, 9개의 구멍이 있는 고리모양의 디스크를 내관에 끼워 산소가 디스크의 구멍을 통해 공급되도록 하였다. 화염의 요동을 줄이기 위하여 제트 화염에 가깝게 설계하였다.

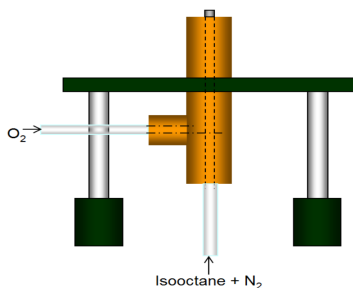


Fig. 1. Sideview of concentric diffusion burner. Oxygen goes into the system through the annulus array of ports whereas isooctane and nitrogen flow through the tube in the center.

Fig.2는 연료 증발 및 공급 시스템을 보여준다. 액상 이소옥탄이 버너에 도착하기 전에 완전히 증발해야만 안정적인 확산 화염을 구현할 수 있기에 액상 이소옥탄이 연료관을 통과하여 이동할 때 연료를 100°C (이소옥탄의 끓는점)로 가열하여 증발이 서서히 이루어지게 하였다. 연료관은 열 테이프로 감은 후, 유리섬유 단열 테이프로 감싸 열손실을 방지하였으며, 두 개의 PID제어기를 가지고 히터를 제어하였다. 질소는 0.8 LPM으로 공급되었고, 증발파이프 안에는 낫쇠구슬을 집어넣어 열교환 면적이 커지게 하는 효과를 얻었다. 액상연료는 연동 펌프(Fisher scientific)를 이용하여 0.0015 LPM로 공급하였다. 증발된 이소옥탄은 질소가스와 함께 버너로 이동하였다. 산소는 2.6 LPM의 유량으로 독립적인 유로를 통하여 공급하였고, 연료와 버너 입구에서 만나게 되어 확산화염이 생성된다. 모든 가스 유량은 디지털 질량 유량 제어계(Alicat Scientific)를 이용하여 1% 정확도를 가지고 제어 되었다. 또한 그을음 발생 억제제($\text{Fe}(\text{CO})_5$)의 효과를 조사하기 위하여 연료 질량 당 첨가제를 4000 ppm으로 이소옥탄에 공급하였다. 이렇게 생성된 화염을 수직 높이에 따라 조사하기 위하여 버너가 수직으로 이동되게 하였고, 버너 입구에서 약 9.4 cm 높이를 시작으로 화염의 끝까지 25개의 다른 지점에서 화염 속 그을음 입자의 특성을 조사하였다.

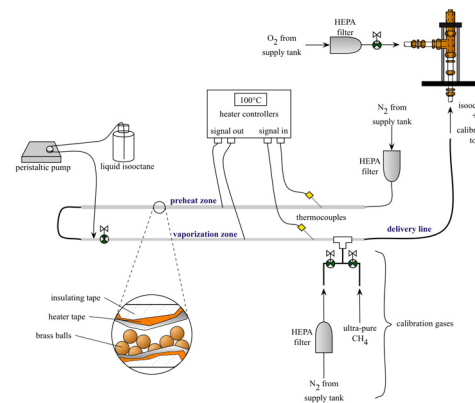


Fig. 2. A Schematic of fuel vaporization system.

3.2 광학 계측 시스템

그을음 입자들의 산란 물성치들을 정의하기 위해 사용된 광학 실험 장치를 Fig.3에 나타내었다. 파장이 532 nm인 더블 진동수 Q-스위치 ND:YAG 펄스레이저를 광원으로 사용 하였다. 레이저의 펄스는 10 Hz로 펄스 에

너지는 0.3 mJ/pulse이다. 레이저 광은 이 레이저는 532 nm 파장용 색 선별 거울에 45도로 반사되어, 조리개를 통과한 후 레이저 빔의 중심부만 초점 렌즈를 통해 조사하고자하는 지점에 조사된다. 화염을 통과할 때 빔의 단면적은 0.0033 cm이고, 그을음 입자로부터 산란된 광은 광전자 배증관(Photomultiplier tube)을 이용하여 입사광의 90도 방향에서 계측되며, 산란광의 세기는 오실로스코프를 이용해 기록하였다.

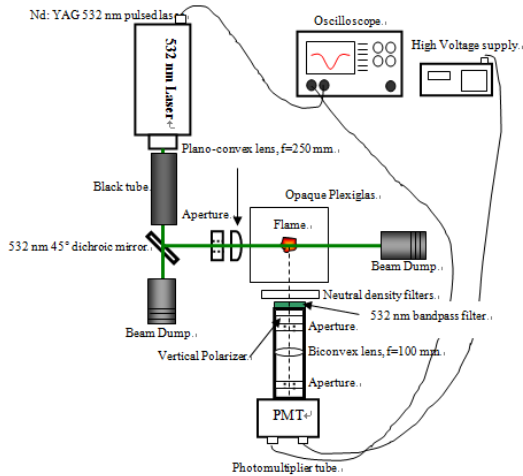


Fig. 3. Top view of the light scattering system setup.

4. 연구방법 및 결과

레이저 광은 수직으로 편광된 광이고 오직 수직으로 편광 된 산란광원만이 PMT를 통해 계측된다. 따라서 수직-수직 미분 산란 계수인 K'_{VV} 가 구하고자 하는 최종 매개변수이다. 이 변수는 PMT로 측정된 신호로부터 두 번의 보정과정을 통해서 정확하게 산출된다. 이 보정과정은 PMT로 측정된 산란 신호 중 미광에 의한 영향을 제거하기 위해 반드시 필요하다. 모든 자연광 및 표면 반사광은 PMT디텍터로 들어가서 실험결과를 상당히 왜곡시킨다. 미광이 크기는 산란광 신호만큼 크기 때문에 미광에 의해 발생한 에러를 줄이는 것이 매우 중요하다. 이 미광의 영향을 줄이기 위하여 조리개와 렌즈를 이용하여 광 산란 부피 최소화했다. 반사율이 높은 광학장비 표면은 검은 페인트로 칠하거나 검은 천으로 덮어 표면으로부터 반사되는 레이저광을 최소화하였다. 추가로 빔이 검은 튜브를 통해 이동하게 하여 미광의 생성확률을 줄

였다. 그럼에도 불구하고, 시스템으로부터 미광을 완전히 제거하는 것은 불가능하다. 그러므로 측정된 산란 신호는 미분 산란 단면적이 이미 알려진 메탄과 질소가스를 이용하여 보정하였다. Fig. 4는 보정 가스와 그을음 입자로부터 측정된 전형적인 PMT 신호를 보여준다.

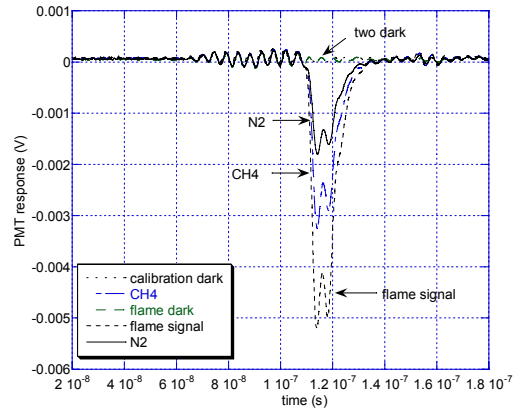


Fig. 4. Typical scattered signal response from photomultiplier tube measuring calibration gases and flames. Calibration gas signals are attenuated by a factor of 100.3, and flame signals are attenuated by a factor of 105 to preserve signal linearity.

앞서 얘기한 것처럼, 미분 산란 계수는 화염 안에서 산란 입자들의 수밀도를 계산하는데 매우 중요한 매개변수이다. PMT로 측정된 산란 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{VV} = I_o \eta (\Delta V \Delta \Omega) N \overline{\sigma'_{VV}} \quad (9)$$

여기서 I_o 는 입사광의 세기이며, η 는 PMT와 광학부품의 효율, ΔV 는 산란부피, 그리고 $\Delta \Omega$ 는 입체각이다. N 과 $\overline{\sigma'_{VV}}$ 는 수밀도와 미분 산란 단면적이다. 이러한 매개변수들 중 $\eta, \Delta V, \Delta \Omega$ 등은 직접 측정이 가능하나 아주 정밀하게 계측하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 계측하고자하는 입자의 산란 신호와 이미 잘 알려진 참고 산란 신호의 비를 구하여, $(\eta \Delta V \Delta \Omega)$ 의 직접적인 계측을 회피할 수 있다. 이 방법으로 $N \overline{\sigma'_{VV}}_{soot}$ 는 아래와 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$(N \cdot \overline{\sigma'_{VV}})_{soot} = (N \cdot \overline{\sigma'_{VV}})_{CH_4} \left(\frac{S_{vv,soot}}{S_{vv,CH_4,measured} - SL} \right) \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (10)$$

여기서 $N\sigma'_{VV}|_{soot}$ 는 식 (7)에 표현된 것 같이 그을음 입자의 미분 산란 계수와 같다. 이 식에서 n 는 화염을 통과하는 광의 투과율이고, SL 은 보정을 통하여 계산한 미광 양이며, 첨자 CH_4 는 메탄 보정 가스를 의미한다.

이 보정 가스들의 산란 신호는 버너 입구에서 약 8 cm 높이에서 측정되었다. 가스 유량은 10 LPM으로 공급되었고, 로타미터 (GE700 Gilmont)를 이용하여 제어하였다. 수밀도 N 과 미분산란단면적, σ'_{VV} (cm^2/sr), 그리고 미분 산란 계수, K'_{VV} ($cm^{-1}sr^{-1}$) 등 각각의 가스에 대하여 측정된 온도를 사용하여 정의하였다. 수밀도는 NIST의 등압 밀도 데이터를 이용하여 계산하였다[6]. 입사파장 694.3 nm에 대한 보정 가스, 메탄과 질소의 미분 산란 단면적은 각각 $4.56E-28$ cm^2sr^{-1} 와 $2.12E-28$ cm^2sr^{-1} 이고, 따라서 입사광 파장 532 nm에 대해 σ'_{VV} 는 아래 식으로 계산되었다.

$$\sigma'_{VV}|_{\lambda_2} = \sigma'_{VV}|_{\lambda_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 \left(\frac{n_{\lambda_2} - 1}{n_{\lambda_1} - 1} \right)^2 \quad (11)$$

여기서 n 은 파장에 따른 굴절률이다. 참고 보정 비율 (R_{ref})은 두 보정가스의 미분 산란 계수의 비율로 정의 될 수 있다.

$$R_{ref} = \left[\frac{K'_{VV}|_{CH_4}}{K'_{VV}|_{N_2}} \right]_{reference} \quad (12)$$

이 참고 보정 비율은 측정된 산란 신호와 신호 안에 속한 미광 신호를 가지고 또 다른 관계식을 만들 수 있다.

$$R_{ref} = \frac{(S_{VV, CH_4, measured}) - SL}{(S_{VV, N_2, measured}) - SL} \quad (13)$$

이 값은 보정 가스들로부터 측정된 산란 신호 안에 포함된 미광의 양을 계산하는데 사용되었다. 이 식에서, $S_{VV, CH_4, measured}$ 와 $S_{VV, N_2, measured}$ 는 측정된 메탄과 질소의 산란 신호이다. 이 관계식을 가지고 그을음 입자의 산란 신호 안의 미광양은 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$SL = \frac{R_{ref} S_{pp, N_2} - S_{pp, CH_4}}{R_{ref} - 1} \quad (14)$$

본 연구에서, 미광 보정을 위한 계측은 화염 안의 그

을음 측정 전에 항상 수행되었으며, 실험 동안 미광에 의한 산란 신호의 평균 왜곡율은 메탄가스 보정 신호의 38.5%정도 되었다. Fig. 4에서 각 신호의 기본라인은 레이저 Q-스위치의 전기 잡음 탓인데, 이러한 노이즈신호들은 다크 신호를 이용하여 제거할 수 있다. 이러한 다크 신호들은 보정가스와 화염 안 그을음 입자의 산란 신호를 측정하기 전 PMT를 레이저 광으로부터 차단해 놓고 측정하였다.

Fig.5는 PMT로 측정한 그을음의 산란 신호를 보정과정을 거쳐 미광의 영향을 제거한 후 앞서 얘기한 과정으로 산출한 미분 산란 계수를 화염의 높이에 대해 나타낸 것이다. 10번의 반복 실험을 수행하여 평균값을 구해 실험적 오차를 최소화하였다. Table 1은 연료 첨가제 첨가 화염(seeded)과 미첨가 화염(unseeded)의 높이에 따른 미분 산란 계수의 평균값과 표준편차이다. 이 산란 계수는 버너 입구에서 화염의 높이가 14 cm근방일 때, 최고가 된 후 화염의 높이가 증가할수록 꾸준히 감소하는 것을 알 수 있다. 이 경향은 본 연구에서 조사한 화염의 영역이 그을음 입자 성장에서 산화 영역이라는 것을 의미한다. 이것은 확산화염의 특성이기도 하다. 철 연료 첨가제를 첨가한 화염과 첨가하지 않은 화염에서 이 미분 산란 계수는 그을음 성장 영역에서는 뚜렷한 차이가 없다. 반면, 화염의 높이가 14 cm이상이 되는 산화영역에서는 연료 첨가제를 첨가한 화염에서 확실히 작은 값을 보인다. 이는 연료 첨가제는 그을음 성장 영역에서는 그을음 억제제의 그을음의 산화를 촉진하는 촉매 역할을 하는 것을 알 수 있다.

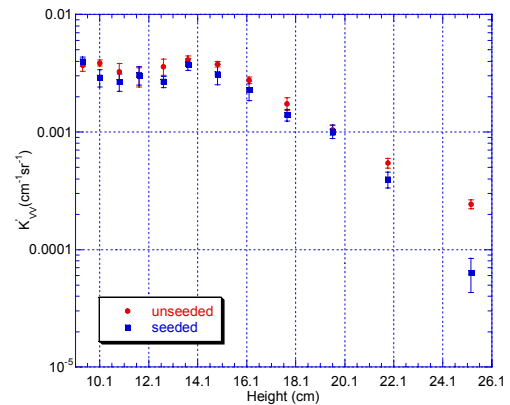


Fig. 5. Unseeded and seeded differential scattering coefficients in logarithmic scale. Error bars represent one standard deviation.

Table 1. Average (N=10) $K'VV$ results of the unseeded and seeded flame and standard deviations. Flame heights are measured from the burner lip. S.D.* represents standard deviation.

Flame Height (cm)	Unseeded $K'VV$ ($\text{cm}^{-1}\text{sr}^{-1}$)		Seeded $K'VV$ ($\text{cm}^{-1}\text{sr}^{-1}$)	
	Average	S.D.*	Average	S.D.*
9.4	3.70E-3	8.59E-04	3.98E-3	7.31E-04
10.1	3.87E-3	4.71E-04	2.91E-3	9.92E-04
10.9	3.26E-3	1.11E-03	2.67E-3	8.99E-04
11.7	2.97E-3	1.11E-03	3.05E-3	1.08E-03
12.7	3.60E-3	1.15E-03	2.68E-3	5.83E-04
13.7	4.10E-3	6.99E-04	3.77E-3	8.65E-04
14.9	3.78E-3	4.21E-04	3.13E-3	1.23E-03
16.2	2.76E-3	3.54E-04	2.28E-3	8.58E-04
17.75	1.74E-3	4.36E-04	1.40E-3	3.25E-04
19.6	1.04E-3	2.04E-04	1.01E-3	2.62E-04
21.85	5.44E-4	1.06E-04	3.95E-4	1.20E-04
25.25	2.44E-4	4.27E-05	6.35E-5	4.07E-05

또한, 산란 실험과 동일한 위치에서 화염의 높이를 따라 두 가지 화염(Seeded와 unseeded)에서 레이저 광의 투과율을 측정하였다. 앞서 언급했던 것처럼, 화염을 통한 투과율은 레이저 광이 화염을 통과하면서 산란 및 흡수에 의해 희석되는 광의 세기와 순수 입사광의 세기의 비로 정의된다. 6번의 투과율 측정 실험을 통하여 산출한 투과율의 평균값과 표준편차를 Table 2에 정리하였고, Fig.6에 나타내었다. 이 결과는 산란 계수 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 연료 첨가물이 첨가된 여부에 상관없이 그을음 성장 영역에서는 그을음 입자의 고밀도로 인하여 투과율이 80%이하 인 것을 알 수 있다. 하지만, 산화 영역에서는 그을음 입자의 밀도가 줄어들면서 투과율이 90%이상으로 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 연료 첨가물이 첨가되었을 때, 그을음 입자의 산화 반응이 촉진되어 투과율이 일반 화염에 비해 약 5%정도 높은 것을 알 수 있다.

Table 2. Average (N=6) transmission results of the unseeded and seeded flames and standard deviations. Flame heights are measured from the burner lip. S.D.* represents standard deviation.

Flame Height (cm)	Unseeded		Seeded	
	Average	S.D.*	Average	S.D.*
9.4	0.7	0.02	0.77	0.03
10.1	0.75	0.02	0.77	0.03
10.9	0.75	0.04	0.75	0.03
11.7	0.72	0.02	0.73	0.03
12.7	0.73	0.04	0.75	0.06
13.7	0.73	0.04	0.70	0.03
14.9	0.74	0.03	0.76	0.04
16.2	0.75	0.05	0.79	0.04
17.75	0.84	0.07	0.88	0.01
19.6	0.88	0.05	0.94	0.02
21.85	0.93	0.04	0.96	0.02
25.25	0.94	0.02	0.97	0.02

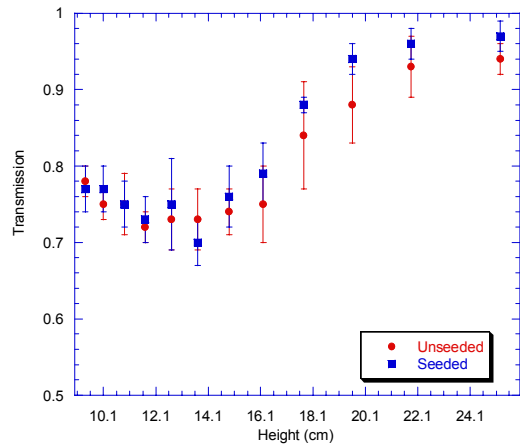


Fig. 6. Transmission through the unseeded and seeded flames.

5. 결론

본 연구에서는 광 산란 기술을 이용하여 확산화염에서 그을음 입자의 성장 및 산화 과정을 미분 산란 계수를 이용하여 분석하였고, 화염에서 발생하는 그을음 생성을 줄이는 연료 첨가제의 효과를 조사하였다. 본 연구에서 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1. 그을음 입자 진화 영역에서는 두 화염 모두에서 그을음 저감의 뚜렷한 특성을 관찰하기 쉽지 않지만, 산화 영역에서는 그을음이 줄어드는 경향이 뚜렷이 나타났다.
2. 연료 첨가제를 첨가한 화염에서는 산화가 더 촉진되어 그렇지 않은 연료에 비해 미분 산란 계수가 더 낮고, 투과율도 약 5% 정도 더 높은 것을 알 수 있다.
3. 연료 첨가제의 역할은 그을음 입자 자체의 생성을 억제하기 보다는 산화과정에서 그을음 입자의 산화를 촉진하는 촉매 역할을 하는 것으로 사료된다.

References

- [1] G. H. Choi, Y. J. Chung, J. M. Kim., R. W. Dibble, S. B. Han, "Basic Performance Characteristics of HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine", Journal of Energy Engineering, 14(4), pp.226-231, 2005.
- [2] S. M. Kim, D. W. Kim, D. S. Yum, H. K. Kim, S. W. Chun, J. H. Ryu, W. K. Lee, "A Study on the PM Exhaust Characteristics of Diesel Urban Bus According

to Diesel Particulate Filter", Proc. of 47th Meeting of KOSAE, 2008.

- [3] K. B. Kim, K. A. Masiello, D. W. Hahn, "Reduction of Soot Emissions by Iron Pentacarbonyl in Isooctane Diffusion Flames", Combustion and Flame, 154, pp.164-180, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.01.011>
- [4] P. A. Bonczyk, "Effect of Ferrocene on Soot in a Pre vaporized Isooctane/Air Diffusion Flame", Combustion and Flame, 87, pp.233-244, 1991.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90110-W](http://dx.doi.org/10.1016/0010-2180(91)90110-W)
- [5] K. B. Kim, "Interaction of Iron Species and Soot Particles in an Isooctane Diffusion Flame", Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida, Gainesville (2006).
- [6] E. W. Lemmon, M. O. McLinden, D. G. Friend, "Thermophysical Properties of Fluid Systems, NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database, 69, 2003.

서 형 석(Hyoungseock Seo)

[정회원]



- 2008년 9월 : University of California at Los Angeles, 기계공학과 (공학박사)
- 2010년 10월 : 삼성중공업, 책임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 중소조선연구원, 책임연구원

<관심분야>

구조해석, 복합소재, 그린선박(Green Ship)

김 기 범(Ki-Bum Kim)

[정회원]



- 2003년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : University of Florida, 기계공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 충북대학교, 기계공학부, 부교수

<관심분야>

친환경 에너지 시스템