

바이오디젤과 디젤 연기입자의 광학특성 및 무차원 광소멸계수 측정에 관한 연구

최석천 · 장영석 · 박설현*[†] · 김연규**

한국생산기술연구원 고온에너지시스템연구그룹, *조선대학교 기계시스템공학과,

**한국항공우주연구원 융합기술연구본부

A Study of Optical Characteristics for Biodiesel and Diesel Smoke Particles and Measuring their Dimensionless Light Extinction Constants

Seuk-Cheun Choi · Yeong-Seok Jang · Seul-Hyun Park*[†] · Youn-Kyu Kim**

Thermochemical Energy System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

*Department of Mechanical Systems Engineering, Chosun University

**Convergence Technology Research Head Office, Korea Aerospace Research Institute

(Received November 17, 2015; Revised November 29, 2015; Accepted November 29, 2015)

요 약

바이오디젤(Soy Methyl Ester, B100)과 디젤(Ultra Low Sulfur Diesel, ULSD)의 연소과정에서 발생하는 연기입자의 무차원 광소멸계수를 측정하였다. 무차원 광소멸계수는 633 nm의 He-Ne 레이저를 이용하여 광학적 방법으로 측정된 연기입자의 체적분율과 중력식 필터법에 의해 채집된 연기입자의 체적분율을 비교하여 결정하였다. 633 nm 대역에서 측정된 평균 무차원 광소멸계수는 각각 바이오디젤의 연기입자가 11.8, 디젤 연기입자가 11.1으로 측정 불확도 범위($\pm 10.1\%$) 내에서 거의 유사하였다. 다만, 라만 spectrum 분석결과를 통해 각 연료에서 발생된 연기입자 간의 광소멸(광흡수/광산란) 특성은 서로 상이할 수 있음을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The dimensionless extinction constants of smoke particles produced from burning of soy methyl ester (B100) biodiesel and ultra low sulfur diesel (ULSD) fuels were measured. To this end, optical measurements of smoke volume fraction with the aid of a He-Ne laser at 633 nm were compared to the simultaneous gravimetric measurements. The average value of measured dimensionless extinction constants at 633 nm was 11.8 for biodiesel smoke particles and 11.1 for diesel smoke particles, respectively whose values are very comparable withing the range of measurement uncertainty ($\pm 10.1\%$). The analysis of Raman spectroscopy revealed that overall characteristics of light extinction between particles produced from each fuel may differ from each other.

Keywords :Dimensionless light extinction constant, Smoke particles, Biodiesel, Diesel

1. 서 론

최근 고유가와 지구온난화 문제에 대한 심각성이 널리 인식되면서 선진국을 중심으로 청정연료에 대한 관심이 높아지고 있다. 다양한 대안 중 미래의 청정연료로 각광을 받고 있는 것은 단연 수소연료와 바이오연료이다. 하지만 수소연료의 경우 강한 폭발성과 대량 수송 및 저장 기술의 한계로 인해 당장 상용화하기에는 어려움이 있다⁽¹⁾. 대표적인 바이오연료로는 바이오에탄올과 바이오디젤이 있으나, 우리나라의 경우 수송용 디젤의 소비가 휘발류 소비에

비해 두 배 이상 점유하고 있고 연료보급 측면에서 기존 인프라의 교체비용이 거의 필요하지 않은 바이오디젤이 청정연료의 대안으로 주목받고 있다⁽²⁾. 특히 바이오디젤은 미생물에 의해 안전하게 분해되며 디젤유와 물리적·기능적 특성이 유사하여 기존 디젤엔진에 수정을 가하지 않고서도 사용할 수 있다. 이러한 장점 때문에 바이오디젤의 연소특성에 대한 연구가 다각도로 이루어지고 있다^(3,4).

최근 전북 군산시(2012년 4월)와 정읍시(2014년 8월)의 바이오디젤 생산업체 화재사례에서 알 수 있듯 바이오디젤 연료도 연소과정을 통해서 다량의 연기입자를 발생시

[†]Corresponding Author, E-Mail: Isaac@chosun.ac.kr
TEL: +82-62-230-7174, FAX: +82-62-230-7171

킬 수 있다. 따라서 바이오디젤의 연소 시 발생하는 연기 입자에 관한 연구^(5,6)는 더욱 엄격해지고 있는 각종 배출 규제와 연계되어 활발하게 이루어지고 있는 추세이다. 아울러 연기입자의 광학적 특성 파악과 체적분율(volume fraction) 측정은 화재 시 인명구조 소방관들의 안전 및 원활한 구조 활동을 위해서도 반드시 필요한 요소이다. 보편적으로 널리 사용되고 있는 연기입자의 체적분율 측정법은 광소멸법으로 이 방식을 이용하는 경우 연기입자의 광소멸계수가 정의되어야만 정확한 값을 측정할 수 있다. 지금까지 수행된 바이오디젤 연기입자의 체적분율 측정에 관련된 연구^(7,8)를 살펴보면, 참고문헌⁽⁹⁾에 제시된 에틸렌, 프로판, 벤젠 연료의 연기입자 굴절지수(refractive index)로부터 이론적으로 계산된 무차원 광소멸계수를 사용하고 있다. 하지만, 연기입자의 무차원 광소멸계수는 연료별로 상이한 것으로 알려져 있으며, 연기입자의 굴절지수로 이론적으로 구한 값과는 큰 차이가 있는 것으로 보고되고 있다⁽¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 바이오디젤 연료의 연소 시 발생하는 연기입자의 무차원 광소멸계수를 실험적으로 측정하여 제시하였고, 유사한 연소특성을 지닌 디젤연료로부터 발생된 입자의 무차원 광소멸계수와 상호 비교분석을 통해 기본적인 광학특성의 차이점을 살펴 보았다.

2. 광소멸계수의 측정 및 계산방법

2.1 실험장치 및 방법

실험장치는 Figure 1에 제시되어 있는 바와 같이 크게 실린지(syringe) 펌프를 통해 동일한 유량의 디젤(ultra

low sulfur diesel, ULSD)과 바이오디젤유(soy methyl ester, B100)를 내경이 0.59 mm인 스테인레스 튜브로 공급하고 연소를 통해 연기입자를 발생시킬 수 있도록 설계된 확산화염(diffusion flame) 버너와 발생된 연기입자와 공기를 혼합시키는 혼합용기(dilution tunnel), 그리고 transmission cell (TC)로 구성되어 있다. TC의 하류 쪽에는 진공펌프가 설치되어 혼합용기에서 공기와 혼합된 연기입자를 TC 안쪽으로 유입시키며, TC 하류 선단에 설치된 필터를 이용하여 연기입자만을 채집하도록 설계되어 있다. 연기입자는 기공(Pore) 크기가 0.7 μm 인 광섬유 필터에 채집되며 연기입자의 축적으로 발생될 수 있는 필터 양단의 압력 차를 보상하기 위해 필터 후단에는 질량유량계(mass flow meter)를 설치하였다. 질량유량계에 설정된 배출 유량은 버블 유량계로 실시간으로 모니터링하여 실험 중 유량이 일정하게 유지되고 있는지를 확인하였다. 충분한 양의 연기입자가 필터에 채집될 수 있도록 조건에 따라 5~8분 동안 실험을 지속하였으며, 필터에 채집된 연기입자의 질량은 정밀저울을 이용하여 측정하였다.

연기입자의 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해 본 연구에서 사용된 방법은 광학적 방법에 의해 측정된 연기의 체적분율과 필터로 채집된 입자의 체적분율의 상관관계로부터 역산하는 방식이다. 광학적 방법으로 연기입자의 체적분율을 측정하기 위해 파장이 633 nm인 헬륨-네온 레이저(50 mW)를 사용하였다. TC를 투과하는 레이저 광의 강도는 연기입자의 광흡수와 광산란으로 인하여 광소멸을 일으키게 된다. 광소멸로 줄어든 광원의 크기를 측정하기 위해 광원 파장대역의 강도를 검출할 수 있는 광검출기(photo detector)를 설치하였다.

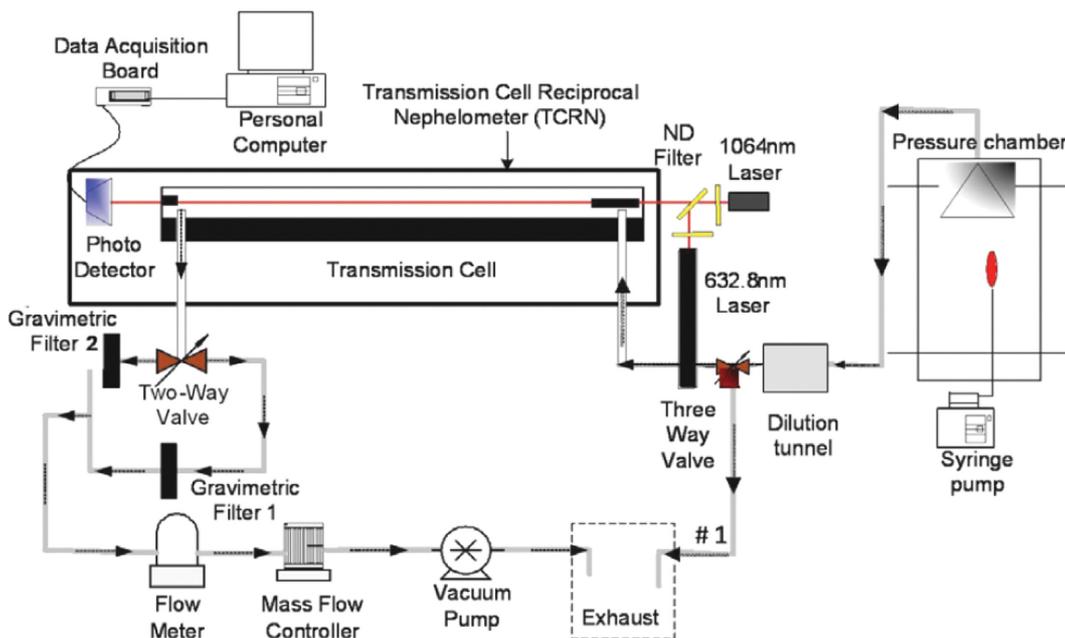


Figure 1. Schematic diagram of experimental-setup.

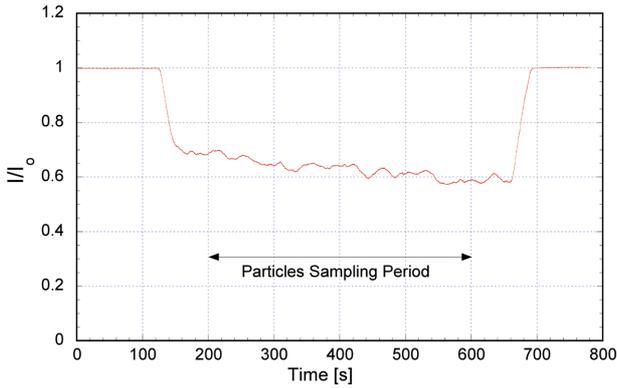


Figure 2. Measured laser transmittance through the transmission cell.

2.2 광소멸계수의 계산방법

연기입자와 혼합된 공기가 TC 안쪽으로 유입되기 전 광원의 입사강도(I₀)를 광검출기로 측정하고 뒤 연기입자가 포함된 공기가 TC를 통과하는 사이 낮아진 광원의 강도(I)를 측정하고 이 값들을 이용하여 계산한 광투과율(I/I₀)을 Figure 2에 도시하였다.

그림에 제시되어 있는 바와 같이 연기입자와 혼합된 공기가 TC에 유입되기 전과 공급이 중단된 뒤의 광투과율(I/I₀)은 항상 일정(I/I₀ = 1)하였고, 유입이 시작된 직후부터 급격히 감소하여 곧 준정상상태(qusai-steady state)에 도달하였다. TC 하류에 설치된 밸브의 조작을 통해 광투과율이 준정상상태에 도달한 직후부터 설치된 필터에 연기입자의 채집을 시작하였다. 이 때 준정상상태에 도달한 평균 광투과율(I/I₀)은 Bouguer 법칙에 의해 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-K_e \frac{f_v}{\lambda} L\right) \tag{1}$$

식(1)에서 K_e는 무차원 광소멸계수, f_v는 광학적으로 측정된 연기입자의 체적분율, λ는 광원의 파장 길이, L은 레이저 광의 경로길이이다. 필터에 채집된 연기입자의 질량은 정밀저울을 이용하여 측정하였으며 식(2)을 이용하여 체적분율로 환산할 수 있다.

$$f_{vg} = \frac{m}{Vtp} \tag{2}$$

식(2)에서 m과 ρ는 각각 연기입자의 질량과 밀도이며, V는 배출유량, t는 연기입자의 채집 시간이다. 연기입자의 밀도는 연료와 상관없이 1.7 g/cm³를 사용하였다⁽¹¹⁾. 한편 식(2)에 의해 계산된 연기입자의 체적분율, f_{vg}는 동일한 시간대에 식(1)의 광투과율(I/I₀) 평균값에 영향을 미치는 연기입자의 체적분율, f_v와 같아야 하므로 무차원 광소멸계수, K_e는 식(3)을 통해 최종 계산할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$K_e = - \frac{Vt\rho \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{Lm} \tag{3}$$

3. 측정결과 및 고찰

식(3)을 통해 알 수 있는 바와 같이 상수로 취급되는 ρ와 비교적 간단한 방법으로 정확하게 측정 가능한 다른 인자들(V, t, L)과는 다르게 레이저 출력 안정성과 광검출기의 작동특성에 따라 영향 받는 광투과율(I/I₀)의 측정결과는 무차원 광소멸계수의 계산에 쉽게 영향을 줄 수 있으므로 주의 깊게 측정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 흡수식 중성(neutral density, ND) 필터를 이용하여 인위적인 광소멸을 생성시키고 식(4)을 이용하여 실험 전 레이저와 광검출기의 성능을 검증하였고 그 결과는 Figure 3에 도시되어있다.

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-ND} \tag{4}$$

그림에서 볼 수 있는 바와 같이, ND 값이 큰 필터를 사용하여 레이저 입사광을 흡수함에 따라 광투과율이 급격히 감소하고 있으며, 식(4)로 계산된 값과 광검출기로 측정된 광투과율이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 무차원 광소멸계수를 측정하기 위해 적용한 기본 가정은 동일한 시간대에 광학적으로 측정된 연기입자의 체적분율, f_v와 필터로 채집된 연기입자의 체적분율, f_{vg}가 같다는 것이므로 TC 안에 연기입자가 쌓이게 되는 경우 식(3)의 m 값에 영향이 미치게 되고 결국 무차원 광소멸계수 계산에서 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 실험 직후 TC 안에 쌓여 있는 연기입자의 양과 분포를 알아보기 위해 TC를 8등분하여 구역을 나누고 각 구역별로

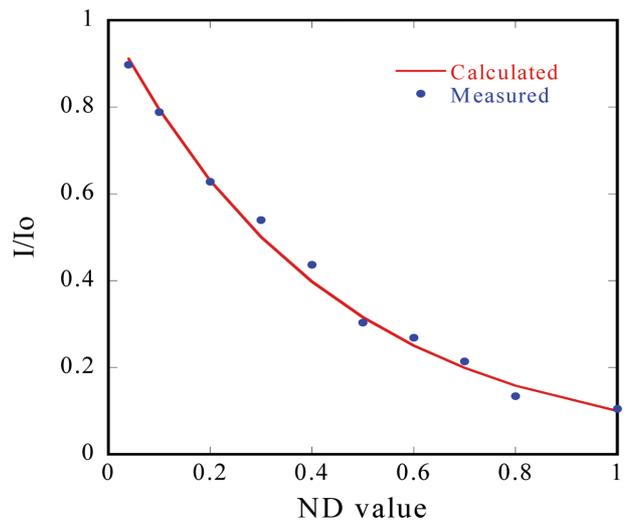


Figure 3. Comparisons between calculated and measured laser transmittances.

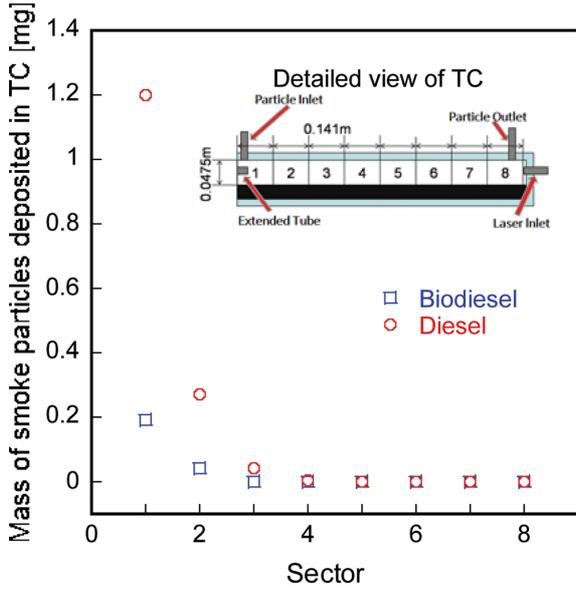


Figure 4. Mass of smoke particles deposited in each of sectors in the TC.

적되어 있는 연기입자의 질량을 측정하여 Figure 4에 도시해 보았다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 디젤연료로부터 발생된 연기입자의 퇴적량(이 상대적으로 바이오디젤에서 발생된 연기입자의 양보다 많았지만 두 연료 모두 3 번째 구역을 넘어서게 되면 TC 내부의 퇴적량은 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1~3 구역에 퇴적된 연기입자로 인한 레이저 광의 추가적인 소멸을 막기 위해 레이저의 광이 출입하는 TC의 입구로부터 무광 페인트가 칠해진 스테인레스 튜브를 3번 구역까지 연장하였다.

Figure 5에는 식(3)에 의해 계산된 무차원 광소멸계수, K_e 평균값과 측정 불확도(uncertainty)가 도시되어 있다.

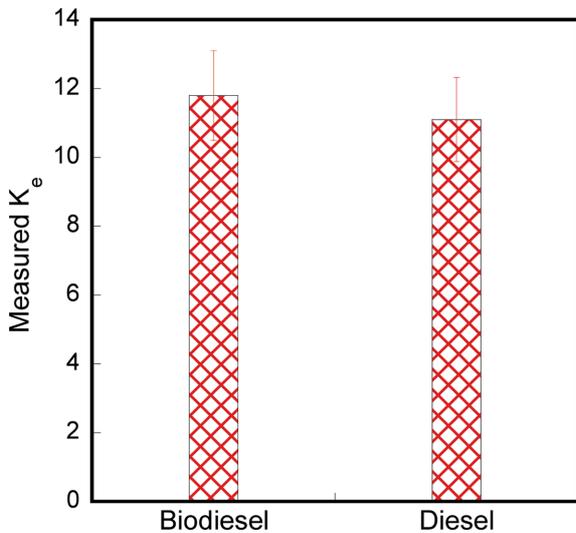


Figure 5. Measured dimensionless light extinction constants for biodiesel and diesel smoke particles.

측정 불확도는 식(3)에 포함되어 있는 각 측정 인자의 계측 시 사용된 계측기의 최대 측정 오차범위와 문헌에 제시되어 있는 연기입자 밀도의 측정 오차범위($\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$)⁽¹¹⁾를 적용하여 식(5)를 통해 계산하였으며, 계산된 측정 불확도는 $\pm 10.1\%$ 이다.

$$\frac{\delta K_e}{K_e} = \sqrt{\sum_n \left(\frac{S_n \partial K_e \delta S_n}{K_e \partial S_n S_n} \right)^2} \quad (5)$$

식(5)에서 δK_e 는 무차원 광소멸계수의 측정 불확도, S_n 은 식(3)에 제시된 각각($n=6$ 개)의 측정 인자, δS_n 는 각 측정 인자의 최대 측정오차를 의미한다. Figure 5에 도시되어 있는 바와 같이 Biodiesel 연료에서 생성된 연기입자의 평균 K_e 값은 633 nm 파장대역에서 11.8이고 Diesel 연료의 경우 평균 K_e 값은 이보다 약간 작은 11.1이지만 측정 불확도 범위 내에 있으므로 거의 유사한 값을 갖고 있다고 할 수 있다. 실험을 통해 측정된 디젤연료의 K_e 값의 경우 Patterson et al.⁽¹²⁾이 633 nm에서 측정한 값(10.5)과 측정 불확도 범위 내에서 일치하고 있다.

일반적으로 화재실험이나 연소실험 시 광소멸법을 이용하여 연기입자의 체적분율을 측정하는 경우 K_e 값은 Rayleigh limit 해법식(식6)을 이용하여 계산하게 된다⁽¹¹⁾.

$$K_e = \frac{36\pi nk}{(n^2 - k^2 + 2) + 4n^2k^2} \quad (6)$$

식(6)에서 n 와 k 는 연기입자 굴절지수(refractive index, $m = n - ik$)의 실수와 허수를 각각 의미하며, 이 때 연기입자의 무차원 광소멸계수를 계산하기 위해서 자주 인용되는 굴절지수는 $1.68 - i0.56$ ⁽⁹⁾이다. 이 값을 이용하여 계산된 K_e 값은 4.5로 본 연구에서 실험적으로 얻어진 값에 비해 훨씬 적은 값이다. 결국 본 연구에서 얻어진 K_e 값을 적용하여 바이오디젤 연기의 체적분율을 계산할 경우, Rayleigh limit 해법식(식 6)으로 얻어진 K_e 값을 이용하는 경우에 비해 훨씬 작아질 수 있음을 의미한다. 앞서 설명한 바와 같이 연기입자에 의한 광소멸은 광흡수와 광산란을 모두 고려한 것이지만, Rayleigh limit 해법에서는 입자에 의한 광흡수만을 고려하여 계산하게 되므로 본 실험을 통해 측정된 값과는 차이가 있으며, 이는 곧 연기입자에 의한 광산란의 비중을 무시할 수 없다는 것을 의미한다.

Figure 6에는 필터에 채집된 연기입자의 질량과 채집시간 동안 얻어진 $\ln(I/I_0)$ 평균값과의 상관관계가 도시되어 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 TC 안쪽으로 유입된 연기입자의 양이 증가함에 따라 $\ln(I/I_0)$ 평균값이 0.22 (optically-thin)에서 1.19 (optically-thick) 사이에서 선형적으로 변화하고 있음을 보여주고 있다. 여기서 주목해 볼만 한 점은 바이오디젤 연기입자에 비해 디젤 연기입자의 유입량이 더 많아야 동일한 광투과율에 도달한다는 점이다. 이는 바이오디젤과 디젤 연기입자의 광소멸 특성이 서로 상이할 수 있음을 의미한다. 통상 광흡수 특성은 연기입자의 탄소

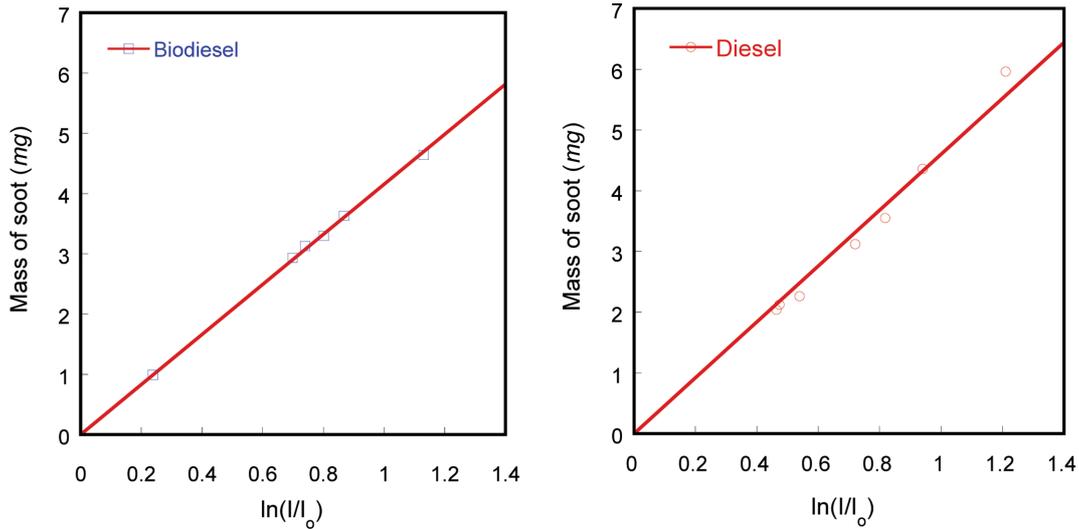


Figure 6. Measured mass of smoke particles on the filters plotted versus $\ln(I/I_0)$.

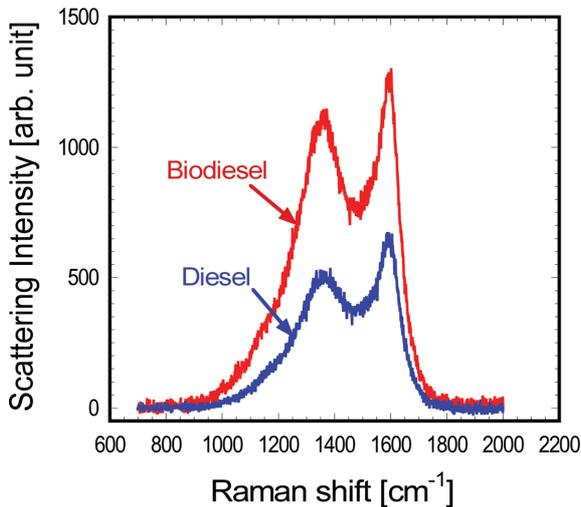


Figure 7. Raman intensities plot for diesel and biodiesel smoke particles.

구조 배열특성에 의해 영향 받을 수 있는 것으로 알려져 있고⁽¹³⁾ 이로 인해 K_c 값이 변화할 수 있는 것으로 보고된 바 있다⁽¹⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 연기입자의 탄소구조 배열상태를 살펴보기 위해 라만 spectroscopy 분석을 실시하였고 그 결과는 Figure 7에 도시되어있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 디젤과 바이오디젤 연기입자 모두에서 현저히 강한 산란강도를 지닌 Dpeak와 Gpeak 곡선이 뚜렷이 관찰되었다. 라만 spectroscopy분석에서 Dpeak (1350 cm^{-1})는 무정형(amorphous)하게 배열된 탄소구조를 의미하는 것이며 G peak ($1580\sim 1600\text{ cm}^{-1}$)는 흑연화(graphitic)된 탄소구조가 존재하고 있음을 의미한다. G peak와 D peak의 비(I_G/I_D)를 이용하면 SP^2 혼성화된 탄소의 정도를 나타낼 수 있으며 I_G/I_D 가 1보다 커질수록 SP^2 혼성화된 탄소의 비율이

Table 1. Summary of Raman Spectroscopy Analysis

| | Diesel | Biodiesel |
|-------------------|--------|-----------|
| I_D (arb. unit) | 533 | 1144 |
| I_G (arb. unit) | 670 | 1299 |
| I_G/I_D | 1.26 | 1.09 |

증가되어 흑연화 정도가 증가하는 것으로 알려져 있다⁽¹⁵⁾. Table 1에 바이오디젤과 디젤 연기입자의 D peak와 G peak 강도 및 강도비(I_G/I_D)를 각각 계산하여 정리해 두었다.

디젤 연기입자의 I_G/I_D 가 바이오디젤 연기입자보다 높아 보다 흑연화된 탄소구조를 지니고 있음을 의미한다. 따라서 바이오디젤 연기입자에 비해 흑연화된 디젤 연기입자는 입사광으로부터 더 많은 에너지를 흡수할 수 있고⁽¹³⁾ 광흡수에 의한 K_c 값 증가가 두드러질 것으로 예상해 볼 수 있다. 결국 바이오디젤과 디젤 연기입자의 K_c 값은 가시광선 영역(623 nm)에서 서로 유사하지만, 두 연료에서 발생한 연기입자로 인한 광흡수와 광산란의 메카니즘은 연료별로 서로 상이할 수 있음을 의미한다. 앞서 기술한 바와 같이 디젤 연기입자의 강한 광흡수 특성에도 불구하고 바이오디젤 연기입자의 K_c 값이 디젤 연기입자와 유사하다는 것은 바이오디젤 연기입자의 광산란 특성이(디젤 연기입자에 비해) 강하기 때문이라고 판단해 볼 수 있다. 통상, 입자에 의한 광산란 특성은 입자의 형상(morphology)에 크게 영향을 받기 때문에⁽¹⁴⁾ 두 연료간 연기입자의 형상에서 있어 큰 차이가 있을 수 있고, 자세한 광학특성을 이해하기 위해서는 이와 관련된 심화 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

층류확산화염으로부터 생성된 바이오디젤(Soy Methyl

Ester, B100)과 디젤(Ultra Low Sulfur Diesel, ULSD) 연기입자의 무차원 광소멸계수를 633 nm 레이저를 이용하여 광학적 방법으로 측정된 연기입자의 체적분율과 중력식 필터법으로 측정된 연기입자의 체적분율을 비교하여 측정하였다. 바이오디젤과 디젤 연기입자의 무차원 광소멸계수, K_c 는 각각 11.8과 11.1로 측정 불확도 범위 내에서 거의 유사하였다. 바이오디젤과 디젤 연기입자의 무차원 광소멸계수의 차이를 파악해 보기 위해 채취된 연기입자의 탄소 배열구조를 라만 spectroscopy를 이용하여 각각 조사하였다. 디젤 연기입자의 경우는 바이오디젤 연기입자에 비해 더 흑연화된 탄소구조를 가지고 있어 광흡수가 촉진되지만, 바이오디젤 연기입자는 디젤연기입자에 비해 높은 광산란효과로 인하여 K_c 값이 높아질 개연성을 가지고 있다. 바이오디젤과 디젤 연기입자에 의한 광소멸특성을 정확히 이해하기 위해서는 연기입자의 형상정보에 대한 심화 연구가 필요하지만, 본 연구에서는 처음으로 바이오디젤 연기입자의 K_c 값을 측정 제시하였고 633 nm의 광원을 이용하여 연기입자의 체적분율을 측정할 경우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. A. Demirbas, "Potential Applications of Renewable Energy Sources, Biomass Combustion Problems in Boiler Power Systems and Combustion Related Environmental Issues", *Prog. Energy Combust.*, Vol. 31, pp. 171-192 (2005).
2. J. H. Bae, "Forecasting the Competitiveness of Biodiesel in Korea", *Korean Energy Economic Review*, Vol. 7, No. 4, pp. 101-131 (2008)
3. A. K. Agarwal, "Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion", *Engines. Prog. Energy Combust.*, Vol. 33, pp. 233-271 (2007).
4. T. D. Durbin, J. R. Collins and M. R. Smith, "Effects of Biodiesel Blends, and a Synthetic Diesel on Emissions from Light Heavy-duty Diesel Vehicles", *Environmental Science & Technology*, Vol. 34, pp. 349-355 (2000).
5. J. Song, M. Alam, A. Boehman and U. Kim, "Examination of the Oxidation behavior of Biodiesel Soot", *Combust. Flame*, Vol. 146, No. 4, pp. 589-604 (2006).
6. A. Boehman, J. Song and M. Alam, "Impact of Biodiesel Blending on Diesel Soot and the Regeneration of Particulate Filters", *Energy and Fuels*, Vol. 19, No. 5, pp. 1857-1864 (2005).
7. N. A. Marley, J. S. Gaffney, J. C. Baird, C. A. Blazer, P. J. Drayton and J. E. Frederick, "An Empirical Method for the Determination of the Complex Refractive Index of Size-fractionated Atmospheric Aerosols for Radiative Transfer Calculations", *Aerosol Science and Technology*, Vol. 34, No. 6, pp. 535-549 (2001).
8. Q. Feng, A. Jalal, A. M. Fincham, Y. L. Wang, T. T. Tsotsis and F. N. Egolfopoulos, "Soot Formation in Flames of Model Biodiesel", *Combust. Flame*, Vol. 159, pp. 1896-1893 (2012).
9. K. C. Smyth and C. R. Shaddix, "The Elusive History of $m = 1.57-0.56i$ for the Refractive Index of Soot", *Combust. Flame*, Vol. 107, pp. 314-320 (1996).
10. J. Y. Zhu, 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*, Vol. 43, pp. 3299-3303 (2000).
11. M. Y. Choi, G. W. Mulholland and T. Kashiwagi, "Comparisons of the Soot Volume Fraction Using Gravimetric and Light Extinction Techniques", *Combust. Flame*, Vol. 102, pp. 161-169 (1995).
12. E. M. Patterson, R. M. Duckworth, C. M. Wyman, E. A. Powell and J. W. Gooch, "Measurements of the Optical Properties of the Smoke Emissions from Plastics Hydrocarbons", *Atmospheric Environment*, Vol. 24, No. 11, pp. 2539-2552 (1991).
13. M. O. Andreae and A. Gelencser, "Black Carbon or Brown Carbon? The Nature of Light-absorbing Carbonaceous Aerosols", *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 6, pp. 3131-3148 (2006).
14. S. C. Choi, "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 (2009).
15. A. C. Ferrari and J. Robertson, "Raman Spectroscopy of Amorphous, Nanostructured, Diamond-like Carbon, and Nanodiamond", *Phil. Trans. R. Soc. Lon. A.*, Vol. 362, pp. 2477-2512 (2004).