

디젤 soot의 크기 측정을 위한 TIER-LII 센서헤드 설계기술 개발

서동규* · 김덕진* · 정재우* · 윤여성* · 이춘범*

A Development of TIER-LII Sensor Head Design for Diesel Soot Size Measurement

Dongkyu Seo[†], Deokjin Kim, Jeawoo Chung, Yeoseong Yoon, Chunbeom Lee

ABSTRACT

The TIER-LII system was established and evaluated using carbon black for diesel particulate size measurement. It contains a new designed sensor head which makes it easier to be measured. Through LII signal analysis of some parameters, we can understand that there were few correlations observed in effect of temperature, shield gas flow rate, and mixture flow rate. However, an amount of difference was observed in different size of particulates.

Key Words : TIER-LII, SEM, Soot, Carbon black, Primary size, PM, Atomizing

기 호 설 명

D_p Primary particle diameter

SEM

Scanning Electron Microscope

TIER-LII Time Resolved Laser Induced Incandescence

1. 서 론

디젤 입자상 물질의 유해성이 배출되는 양 뿐만 아니라 그 크기에 관련되어 있다고 알려짐에 따라 많은 연구자들은 크기 측정에 관하여 관심을 갖고 있다.

입자의 크기를 측정하는 방법은 상당히 다양하게 연구되어왔는데, 가장 확실한 방법은

gravimetric 한 방법으로 샘플하여 TEM 이미지로 크기와 분포를 확인하는 것이겠는데 이것은 ex-situ 라는 한계를 극복할 수 없다.

최근의 디젤 입자상 물질의 평가에 대하여 주로 언급되고 있는 방법으로 ELPI, SMPS, LII가 있는데 ELPI는 공기역학적 방법으로 (aerodynamic method) 가속된 입자가 갖는 관성의 차이를 이용하여 다단 임팩터에 크기별로 구분하는 원리이며, SMPS는 전자적 이동성 (electrical mobility)을 이용하는 방법으로 전기장에 의해 대전된 입자가 전하에 의한 이동성을 갖는 것을 측정하는 원리이며, LII는 입자의 운동

* 자동차부품연구원(KATECH)

† 연락처자, dkseo@katech.re.kr

성(mobility)과는 전혀 다른 방법으로, 레이저에 조사된 입자의 열적 평형식을 기본으로 복사방출된 에너지로부터 입자에 대한 정보를 얻는다.[1,2]

LII를 이용하여 특히 입자의 크기를 알아보고 하는 경우 TIER-LII(time resolved LII) 라는 표현을 쓴다. 이것은 가열된 입자가 주위온도까지 냉각될 때 온도 기울기가 입자의 크기와 반비례하는 것을 이용하는 것인데, 이때 신호가 발생하는 시간이 불과 수백 나노 초에 불과하기 때문에 높은 시간해상도의 해석이 필요하기 때문이다.

디젤 입자상 물질을 계측할 때 가장 문제가 되는 점은 샘플링 과정과 계측 과정에서 본래의 형태와 크게 변할 수 있다는 점이다.[3] 이러한 이유로 샘플링 과정에서 적절한 유로의 설계, 희석 그리고 가열 등의 절차를 동반하게 된다. 측정 체적에서 입자의 상태에 대한 변형의 요인을 제거하고, 간단한 구조로 제작하여 이동이나 휴대가 가능하도록 하고, 유지 보수가 간단한 형태로 LII 시스템을 구성하는 것은 측정 시스템의 설계기준이 될 것이다.

실제 배기관에서 LII 기술을 적용하기 위해서는 잘 알고 있는 크기의 PM에 대하여 LII신호의 보정이 필요한데 기존 연구가들에 의해서 다양한 보정방법이 알려져 있다. 동축류 확산화염에서 서로 다른 C/H 비를 갖는 연료를 사용하여 화염을 형성하고, 화염의 적절한 위치에서 soot을 샘플링하고 이것에 대하여 LII 와 TEM 이미지를 확인하는 방법은 soot의 질량유량을 크게 하기 힘들고 샘플링이 복잡하다.[4-7] 샘플링 방법을 크게 간단화 시킨 방법으로 역확산화염(inverse diffusion flame)을 이용한 방법이 있는데 이것은 화염면에서 soot이 산화되지 못하고 배출되기 때문에 샘플링 방법이 상당히 간단하고 당량비 변화에 따라서 입자의 크기를 제어할 수 있다. 하지만 생성된 soot의 C/H 비가 일반적인 확산화염과 다르다는 단점을 갖고 취급이 간단하지 않은 않다.[8] 다양한 운전조건에서 실제로 샘플링한 PM의 TEM 이미지와 LII 신호를 비교하여

보정하는 방법은 가장 신뢰성이 높은 방법으로 보이지만 상당히 많은 노력이 필요한 방법이다.[9]

잉크의 원료나 프린터 토너 등에 사용되는 카본블랙은 제작원리가 soot의 생성원리와 기본적으로 같아서 soot을 모사하기에 적당한 재료이다. 제품의 사양이 상세하게 제공되기 때문에 LII 신호를 예측하기 위한 계산을 할 경우 신뢰성 높은 값을 얻을 수 있고, 질량유량이나 부피분율 등 모사 가스의 사양을 비교적 손쉽게 제어할 수 있다는 장점이 있다.[10-12]

본 연구에서는 카본블랙이 섞인 액체를 무화(atomizing)하여 디젤 모사가스를 만드는 방법을 사용하여 LII 시스템의 핵심 부품인 센서헤드의 성능을 알아보았다. 이것은 추후에 실제 디젤입자를 LII로 측정하기 위한 선행연구로써, 설계된 측정장치의 성능을 평가하고 추후에 카본블랙과 디젤입자 사이에 서로 다른 물성치를 적용했을 때, 디젤입자의 LII 신호를 보정하는데 활용될 것으로 기대된다.

2. 장치 및 구성

Figure 1은 적은 공간에서 간편한 실험이 가능하도록 샘플라인과 센서 부품을 모듈화 하여 제작한 센서헤드를 나타낸다. 레이저빔(532 nm, pulse duration 7 ns, FWHM) 사용했다. 의 입/출구와 센서 장착위치에는 윈도우가 장착되는데, soot에 의한 윈도우의 오염은 soot의 부피분율이 적을 경우 무시할 만하다고 알려져 있으나[13] 쉴드가스(shield gas, N₂)를 사용하여 윈도우의 오염과 센서부위의 과열을 방지하였다. 이 때 쉴드 가스가 측정체적 내 샘플가스의 유동장에는 영향을 주지 못하도록 센서헤드의 내부 형상을 설계하였다. 샘플된 가스가 센서헤드를 통해 지나가게 되면 측정체적을 통과한 빔으로부터 내부 반사나 기타 이유로 인한 신호 교란을 막기 위하여[14] 빔 덤프와 핀홀 등의 적절한 광학부품을 배치하였다. 발생한 LII 신호는 중심파장 400 nm

인 bandpass필터(FWHM 40)을 통과하여 PMT(hamamatsu, R955)로 검출된다. 차후에 LIS와 동시계측을 할 수 있도록 대칭형으로 LIS 장치를 했고 센서헤드에 일체형으로 장착하였다.

검출된 신호는 디지털 오실로스코프(wavepro 700)에 저장하였고 PC를 이용하여 데이터를 분석하였다. Fig. 2와 실험장치 구성도 이며 Fig. 3는 센서헤드와 실험장치 구성을 보여준다.

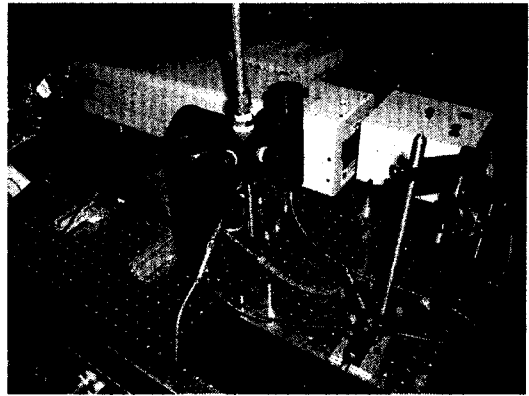


Fig. 3 Experimental setup

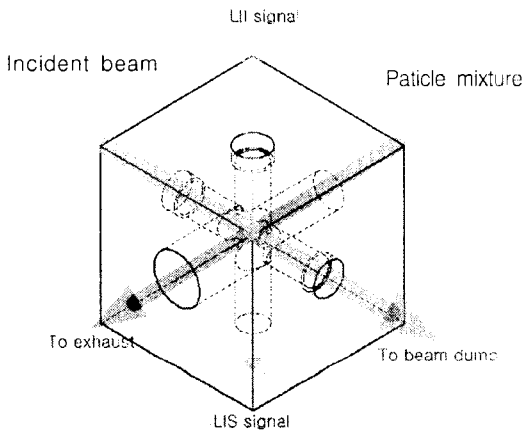


Fig. 1 Concepts of the sensor head

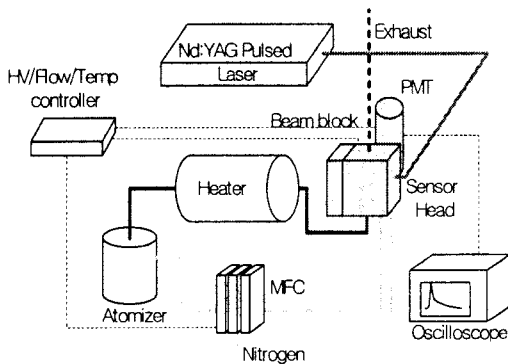


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

실험에서 디젤입자를 모사하기위해 사용된 카본블랙은 DEGUSSA Group의 제품을 사용했고 30 nm(HIBLACK 10)와 45 nm(HIBLACK 150B)의 두 제품을 사용하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 카본블랙에 대한 SEM 이미지 이다. 기존

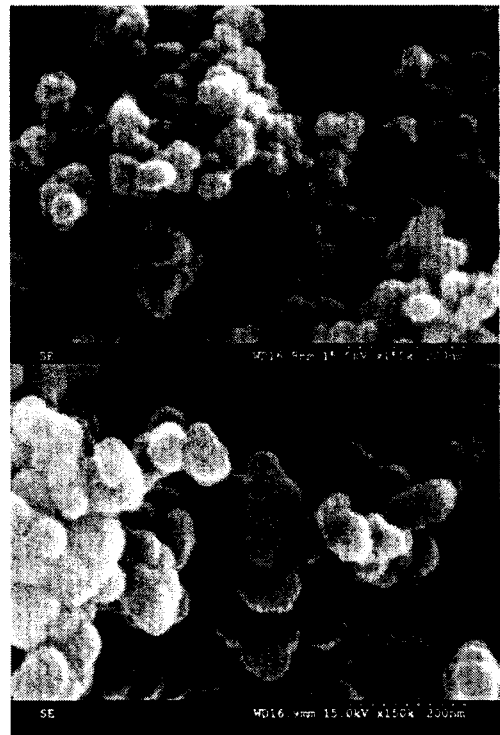


Fig. 4 SEM image of the typical carbon black (a) 30 nm (b) 45 nm

에 알려진 soot의 형태와 매우 흡사한 구조를 갖고 있음을 알 수 있다.

디젤 모사 가스는 이소프로필알코올과 카본블랙의 혼합액체를 단일 노즐 무화기(single nozzle atomizer, HPAT-05)에 담은 후 질소기체로 압력을 가하여 무화 시킨 후, 가열된 스테인리스 튜브를 지나면서 액체 성분이 모두 증발하는 방

법으로 제조하였다. 스테인리스 튜브를 가열하는 히터는 센서헤드 입구에서 혼합기의 온도를 측정하여 PID 제어하여 원하는 온도로 조절 할 수 있도록 하였다.

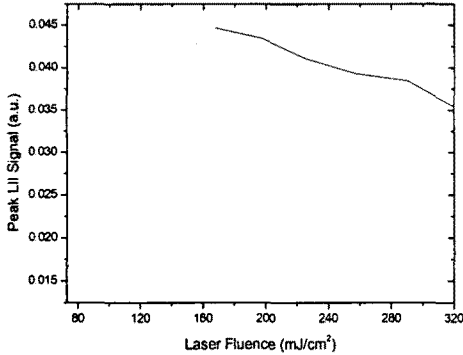


Fig. 5 Effect of the laser fluence

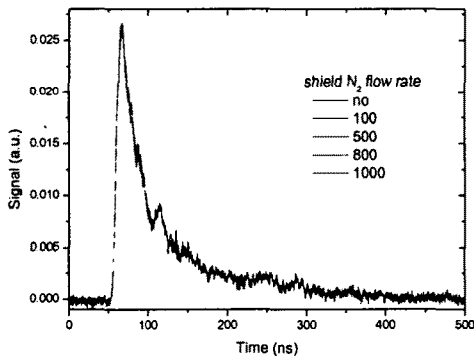


Fig. 6 Effect of shield gas flow rate

3. 결과 및 고찰

적절한 LII 측정 조건을 찾고, 신호에 영향을 미치는 인자들에 대하여 알아보기 위하여 몇 가지 예비실험을 수행하였다. 먼저 LII신호를 취득하기 위한 최적의 레이저 강도를 결정하기 위하여 레이저의 강도를 변화해 가면서 LII신호의 크기를 알아보았다. Fig. 5는 이 과정을 통하여 얻은 데이터를 나타낸다.

레이저의 에너지가 증가할 수록 LII 신호가 증가하고 신호가 최고점에 도달하면 다시 감소했는데 이것은 입자의 표면에서 증발되는 성분이 증가하면서 백열광을 방출하는 표면적이 감소하기 때문으로 해석된다. 최적의 레이저 광량은 신호가 최고를 나타내는 170mJ/cm² 근처로 선정하였다.

센서방향의 관측창을 입자의 오염으로부터 보호하고, 센서가 과열되는 것을 방지하는 쉴드 가스가 LII 신호에 영향을 주는가를 알아보기 위하여 쉴드 가스의 유량을 변화시켜 가면서 신호를 측정하였다. Fig. 6은 이 실험의 결과로써 쉴드 가스는 측정체적에 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

카본블랙과 이소프로필 알코올의 혼합액체를 무화(atomizing)하기 위한 기체로 질소를 선정하였는데 질소의 유량에 따라서 무화특성이 변화하면서 LII신호에 영향을 주는지 알아보기 위하여 질소유량을 변화시키면서 LII신호를 측정하였다. Fig. 7은 이 실험의 결과를 나타낸다. 혼합기 유량이 변화하면 센서헤드내 일정한 단면적의 유로에서 혼합기의 밀도가 변화하므로 입자의 체적분율이 상승하고 결과적으로 신호가 커진다. 그러나 무차원화 시키면 그 차이는 나타나지 않으며 TIER-LII 신호는 유량이나 입자 체적분율로부터 영향을 거의 받지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

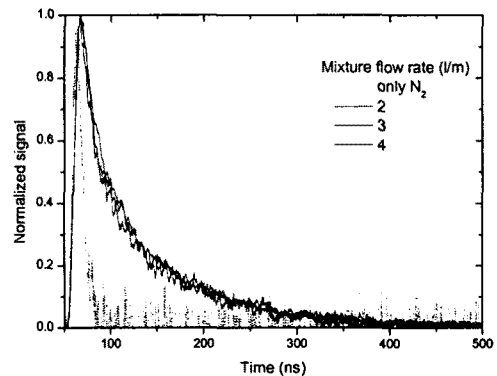


Fig. 7 Effects of the mixture flow rates

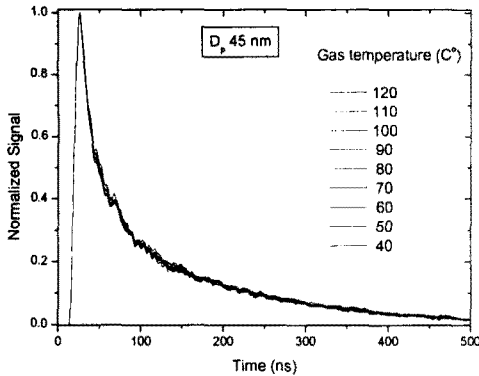


Fig. 8 Effect of the initial temperature

Figure 8은 primary 입자 크기 45 nm에 대하여 센서헤드 입구의 온도를 40 °C에서부터 120 °C까지 변화하면서 신호를 알아본 것이다. TIER-LII 신호는 입자의 냉각과정에 직접적인 영향을 받기 때문에 초기 입자의 온도가 중요한 변수로 알려져 있다. 그러나 실험범위 내에서는 온도에 대하여 민감한 영향을 받지 않는 것으로 나타났기 때문에, TIER-LII를 자동차 배기관 후단과 같이 화염온도보다 크게 낮은 온도 범위에서 사용한다면 온도에 의한 영향은 크게 고려하지 않아도 되는 것으로 생각된다.

Figure 9은 몇가지 예비실험을 통하여 결정된 조건에 대하여 D_p 30 nm, 45 nm에 대한 TIER-LII 신호를 나타낸다. 추후에 실제 디젤입자의 크기를 측정하는 장치의 보정실험의 개념에서 결과를 살펴보면 간단한 계산 로직이 좀 더 선호되므로, 3차 커브 피팅이 더욱 실험값과 일치되는 경향을 보였으나 2차 피팅을 하였다. 그림에서 보정 커브와 실험 데이터가 잘 일치하는 구간은 75 ns 지점부터 250 ns 구간 이므로 이 두 시간 위치에서 TIER-LII 신호의 기울기를 구하고 그 기울기로 입자의 크기를 알아보는 것은 합리적인 입자의 크기측정방법이라고 생각된다.

지금까지의 실험은 30 nm 와 45 nm의 두 가지 경우에 대한 결과만 있으므로 실제로 다양한 입자의 크기를 갖는 디젤에 대하여 바로 적용하

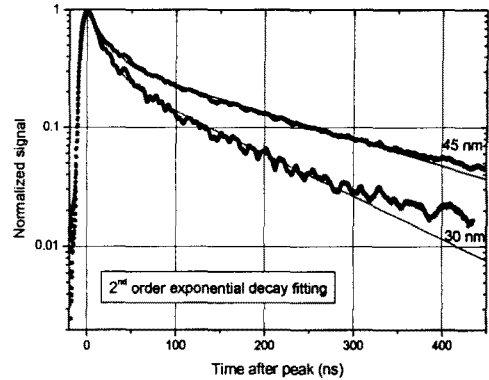


Fig. 9 Results of the TIER-LII for the different primary sizes

는 것은 부족하다. 좀 더 다양한 입자에 대한 실험을 한다고 해도 실험 조건 사이에는 보간을 통하여 예측하는 방법밖에 없으므로 시뮬레이션을 통하여 실험하지 못한 조건에 대한 값을 예측하는 것은 필수적이라고 생각된다. 추후에는 개발된 설계기술 및 계측기술이 실제 엔진 배기관에 적용된 실시간 PM 계측기술로 발전될 것으로 기대된다.

4. 결론

디젤 입자의 크기를 측정하기 위한 TIER-LII 시스템을 구성하기 위하여 센서헤드 모듈을 제작하였다. 입자를 모사하기 위하여 카본블랙을 이용하였고 이것의 형상을 확인하기 위하여 SEM 이미지를 취득하였다. 몇몇 가지 예비실험을 통하여 최적의 실험조건을 선정하였고 이 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험을 위하여 소형/모듈화 제작된 센서헤드는 모사가스를 이용한 실험에서 정상적인 성능을 나타내었으며, 고온 가스와 입자에 의한 오염을 방지하는 구조로 설계되었기 때문에 추후 디젤 배기입자를 측정하기 위한 장치로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 카본 블랙의 형상은 매연 입자와 매우 흡

사하며 제조 원리상 디젤입자의 모사 입자로서 가장 간단하게 사용 할 수 있다.

(3) 상온에 가까운 온도범위에서 온도에 의한 TIER-LII 신호의 변화는 무시할 만 했으므로 화염내 계측이 아닌 배기후단처럼 화염온도보다 충분히 낮은 온도의 가스에서 입자의 측정에 TIER-LII 방법을 적용할 경우 배기가스 온도를 제어하거나 신호에 보정계수를 적용하는 것은 정밀하게 할 필요가 없을 것으로 생각된다.

(4) 추후에는 LII와 LIS 동시 계측이 가능하도록 설계된 본 장치를 이용하여 실제 디젤 차량의 배기관에서 PM의 실시간 계측 기술이 진전될 수 있으리라고 기대된다.

후 기

이 연구는 2004년 산업자원부에서 시행한 정책연구과제를 통해 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- [1] Lynn A. Melton, "Soot Diagnostics Based on Laser Heating," *Applied Optics*, Vol. 23, No. 13, 1984, pp. 2201-2208.
- [2] David L. Hofeldt, "Real-Time Soot Concentration Measurement Technique for Engine Exhaust Streams," SAE 930079.
- [3] Robert M. Green, and Peter O. Witze, "Laser-Induced Incandescence and Elastic-Scattering Measurements of Particulate-Matter Volume Fraction Changes during Passage Through a Dilution Tunnel," *Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2000
- [4] Randy L. Vander Wal, Tomas M. Ticich, and Brock Stephens, "Can Soot Primary Particle Size be Determined Using Laser-Induced Incandescence?," *Combustion and Flame*, Vol. 116, 1999, pp. 291-296.
- [5] S. Gupta, R. Poola, and R. Sekar, "Issues for Measuring Diesel Exhaust Particulates Using Laser Induced Incandescence," SAE 2001-01-0217.
- [6] Stefan Will, Stephan Schraml, Katharina Bader, and Alfred Leipertz, "Performance Characteristics of soot primary particle size measurements by Time-Resolved Laser-Induced Incandescence," *Applied Optics*, Vol. 37, No. 24, 1998, pp. 5647-5658.
- [7] P. Roth, and A. V. Filippov, "In Situ Ultrafine Particle Sizing by a Combination of Pulsed Laser Heatup and Particle Thermal Emission," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 27, No. 1, 1996, pp. 95-104.
- [8] 이의주, 신현준, 오광철, 신현동, "인버스 확산화염에서의 나노 수트 입자 생성," 제 27회 KOSCO 심포지움 논문집, 2003, pp. 19-26.
- [9] S. Schraml, C. Heimgärtner, S. Will, A. Leipertz, and A. Hemm, "Application of a New Soot Sensor for Exhaust Emission Control Based on Time Resolved Laser Induced Incandescence(TIER-LII)," SAE 2000-01-2864.
- [10] David R. Snelling, Gregory J. Smallwood, Ömer L. Gülder, William D. Bachalo, and Subramanian Sankar, "Soot Volume Fraction Characterization Using the Laser-Induced Incandescence Detection Method," *10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2000.
- [11] David R. Snelling, Gregory J. Smallwood, Ömer L. Gülder, and William D. Bachalo, "A Calibration-Independent Technique of Measuring Soot by Laser-Induced Incandescence Using Absolute Light Intensity," *The Second Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute*, 2001.
- [12] Stefan Dankers, Alfred Leipertz, Stefan Will, Jorg Arndt, Karl Vogel, and Stephan Schraml, "Time-Resolved Laser-Induced Incandescence for In-Situ Nanoparticle Characterisation in Different Reactors,"
- [13] G. J. Smallwood, D. Clavel, D. Gareau, R. A. Sawchuk, D. R. Snelling, P. O. Witze, B. Axelsson, W. D. Bachalo, and Ö. L. Gülder, "Concurrent Quantitative Laser-Induced Incandescence and SMPS Measurement of EGR Effects on Particulate Emissions from a TDI Diesel Engine," SAE 2002-01-2715
- [14] Mun Young Choi, and Kirk A. Jensen, "Calibration and Correction of Laser-Induced Incandescence for Soot Volume Fraction Measurement," *Combustion and Flame*, Vol. 112, 1998, pp. 485-491.