

## 압축 착화 엔진에서 기존 및 저온 디젤 연소에서 발생하는 배기가스의 입자상 물질에 관한 특성 비교

정용진\* · 신현동\* · 배충식\*†

### Assessment of Particulate Matters from an Exhaust Gas for Conventional and Low Temperature Diesel Combustion in a Compression Ignition Engine

Yongjin Jung\*, Hyun Dong Shin\*, Choongsik Bae\*†

#### ABSTRACT

The characteristics of particulate matters (PM) from an exhaust gas for conventional and low temperature diesel combustion (LTC) in a compression ignition engine was experimentally investigated by the elemental, thermogravimetric analysis. Morphology of PM was also studied by the transmission electron microscopy. PM for LTC shows that it contains more volatile hydrocarbons, which can be easily evaporated than conventional regime. PM for LTC is comprised of smaller primary particles.

**Key Words** : Soot, Particulate matter (PM), Thermogravimetric analysis (TGA), Transmission electron microscopy (TEM), Low temperature diesel combustion (LTC)

압축 착화 방식의 디젤 엔진은 스파크(spark) 점화 방식의 가솔린 엔진에 비해 상대적으로 높은 압축비로 인해 열효율이 높은 장점이 있어, 수송 및 발전용으로 널리 사용된다. 그러나 디젤 엔진에서 발생하는 배기 배출물 중 질소산화물(NOx; nitrogen oxide)과 입자상 물질(PM; particulate matter)은 점점 강화되어 가는 배기 배출물 규제를 만족시키기 위하여 저감되어야 할 물질들이다 [1]. 따라서 질소산화물과 입자상 물질을 저감시키기 위하여 선택적 환원 촉매(SCR; selective catalytic reduction)나 디젤 입자 필터(DPF; diesel particulate filter)와 같은 후처리장치와, 이른 분사 전략과 배기가스 재순환(EGR; exhaust gas recirculation) 적용과 같은 실린더(cylinder)내 연소개선기술이 발전되고 있다. 이러한 실린더내 연소개선기술 가운데 대용량의 배기가스 재순환을 적용하여 입자상 물질과 질소산화물을 동시에 저감한 기술을 저온 디젤 연소(low temperature diesel combustion)라 한다 [2]. 배기가스 재순환 기술은 흡기로 유입되는 공기의 일부를 배기가스로 대체하는 기술로 배기가스 내의 열용량이 큰 이산화탄소와 수증기에 의해 연소온도를 낮추어 질소산화물과 매연의 생성을 억제하는 저온 디젤 연소의 필수 요소이다. 저온 디젤

연소는 입자상 물질과 질소산화물을 낮추는 장점을 가지고 있지만, 낮아진 연소온도로 인하여 탄화수소(HC; hydrocarbon)와 일산화탄소(CO; carbon monoxide)의 산화가 어렵기 때문에 배출량이 늘어나는 단점을 지니고 있다 [3].

저온 디젤 연소에 대한 관심과 입자상 물질에 대한 규제 강화로 인해 관련 연구는 활발히 진행되고 있다. 최근의 연구에서 scanning mobility particle sizer (SMPS)나 electric low-pressure impactor 등을 이용하여 입자상 물질의 입경 분포를 살펴본 결과, 저온 디젤 연소에서의 입자상 물질은 기존의 디젤 연소에 비해 핵생성모드(nucleation mode)에서 개수가 증가하고, 전체 질량은 감소하는 것으로 발표되었다 [4,5]. 하지만, 앞서 언급한 측정 방식은 핵생성모드에서 측정되는 입자들이 주로 탄소로 이루어진 매연(soot)에서 비롯되는 것인지 혹은 탄화수소, 황산화물(sulfate), 수증기와 같은 휘발성 물질(VOF; volatile organic fraction)에서 기인하는 것인지 판단하기 어려워 투과 전자 현미경(transmission electron microscope)과 같은 장비들을 이용해 측정하고 있다 [6].

본 연구에서는 압축 착화 엔진에서 기존의 연소 방식과 저온 디젤 연소 방식에서 발생하는 배기가스 내의 입자상 물질에 대하여 열중량 분석(thermogravimetric analysis), 원소 분석(elemental analysis) 및 투과 전자 현미경 분석을 실시하여 그 차이점을 알아보려 한다.

실험에 사용된 엔진은 단기통 직접 분사식 압축

\* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042) 350-3044

FAX : (042) 350-8820

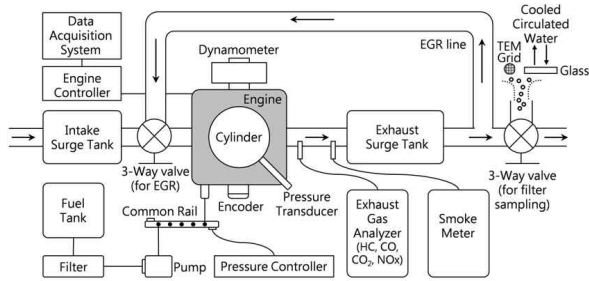


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

착화 엔진으로 배기량 980 cm<sup>3</sup>이고, 압축비는 17.4이다. 연료 분사 정치는 커먼레일 시스템(common-rail system)을 사용하였으며, 분사를 위한 명령(command) 신호와 분사 압력은 전용 조절 장치에 의해 제어되었다. Fig. 1과 Table 1은 실험 장치에 대한 개략도와 엔진 제원을 각각 보여준다. 배기 가스 후단에 삼방향 방식 밸브를 설치하여 입자상 물질에 대한 포집(sampling)을 하였다. 열중량 및 원소 분석에 앞서 연소 기간 동안 발생하는 수증기의 응축을 제거하기 위하여 항온항습조에 105°C로 24 시간 두었다. 저온 디

Table 1 Engine specification

Cylinder	1
Valves per cylinder	4
Bore × Stroke (mm)	100 × 125
Displacement (cm <sup>3</sup> )	980
Compression ratio	17.4

젤 연소를 구현하기 위하여 배기가스 재순환을 적용하였으며, 흡기와 배기에서의 이산화탄소의 비로 배기가스 재순환율을 정의하였다. 분사량과 분사 시기는 각 연소 방식을 대표할 수 있도록 선정하였으며 Table 2에 정리하였다. 엔진 회전수는 1200 rpm(revolution per minute)이며, 자연 흡기(naturally aspirated)상태로 실험하였다.

Fig. 2는 기존의 디젤 연소와 저온 디젤 연소에서의 열방출율(heat release rate)을 보여준다. 기존의 디젤 연소가 갖는 특징인 착화 지연(ignition delay), 예혼합 구간(premixed burn), 혼합 제어 구간(mixing-controlled burn), 그리고 후연소

Table 2 Experimental condition

	Conventional combustion	Low temp. combustion
Injection pressure (MPa)	50	160
Injection quantity (mg/stroke)	43	30
Injection timing (°CA BTDC)	10	25
EGR rate (%)	0	59
IMEP (MPa)	0.83	0.44
O <sub>2</sub> concentration (%)	21	9.5
Exhaust temperature (°C)	463	263

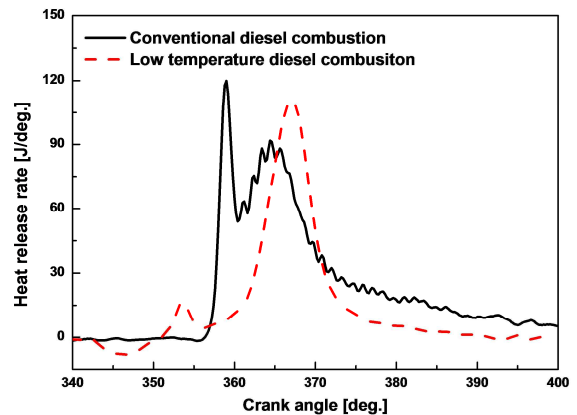


Fig. 2 Heat release rate with regard to each combustion mode

구간을 잘 보여준다. 반면 저온 디젤 연소의 경우, 이른 분사 시기와 배기가스 재순환으로 인하여 착화 지연 동안 향상된 혼합은 저온 산화 반응(low temperature reaction)과 고온 산화 반응(high temperature reaction)을 갖는 연소 특징을 지니게 된다. 배기가스 배출물의 경우, 기존의 디젤 연소에서 입자상 물질과 질소산화물이, 저온 디젤 연소에서 미연 탄화수소와 일산화탄소가 많이 배출되는 것을 Fig. 3과 같이 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 원소 분석을 통한 무게 분율 결과를 보여준다. 탄소 성분의 경우, 기존의 디젤 연소에서 더 큰 무게 분율을 차지하였으며, 수소와 산소 성분의 경우, 저온 디젤 연소에서 더 큰 무게 분율을 차지하였다.

Fig. 5는 분당 10°C로 가열되고 공기 분위기에서의 열중량 분석의 결과를 보여준다. 일반적으로 DPF 등에 포집된 입자상 물질은 150°C까지 응축된 수증기의 증발이 일어나며, 이 후 200°C에서 420°C까지 탄화수소의 탈착 및 휘발이 일어난다. 이 후의 온도에서는 주로 탄소로 이루어진 매연의 산화과정이 발생한다 [7]. 탄화수소 구

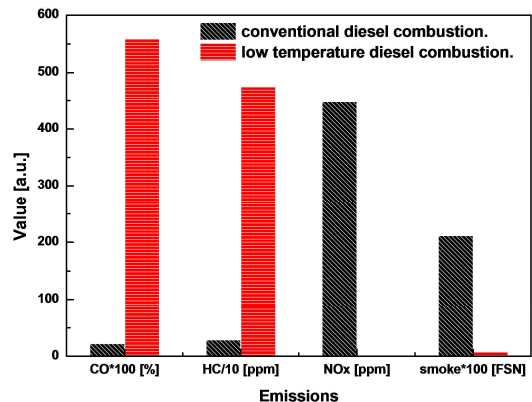


Fig. 3 CO, HC, NOx, and smoke Emissions for each combustion mode

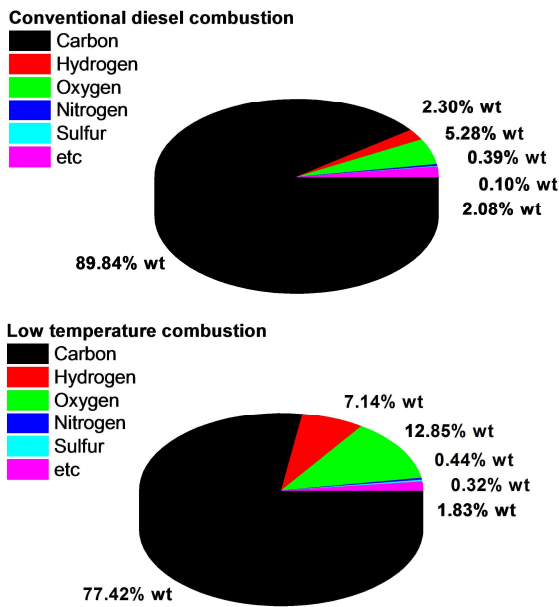


Fig. 4 Elemental analysis for each combustion mode

간의 탈착 및 휘발이 일어나는 구간을 살펴보면, 이 구간에서 저온 디젤 연소가 기존의 디젤 연소에 비해 상대적으로 질량 저감(mass reduction)이 큰 것을 알 수 있다. 이는 앞서 엔진 실험의 배기가스 배출물 결과에서 확인한 저온 디젤 연소에서 발생한 다량의 미연 탄화수소가 입자상 물질에 포함된 것으로 생각된다. 매연이나 그 표면에 붙은 탄화수소들은 휘발되고 난 후에 매연의 표면적을 증가시키고 동공을 발생시켜, 매연과 산소의 접촉을 원활히 하므로 산화과정을 증가시키는 원인이 된다 [8]. 저온 디젤 연소의 경우, 다량의 탄화수소로 인하여 매연의 산화반응이 활발히 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 투과 전자 현미경을 통하여 얻은 저온

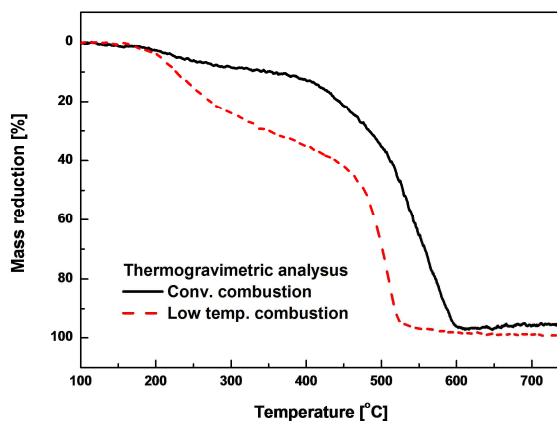


Fig. 5 Mass reduction from the thermogravimetric analysis for each combustion mode

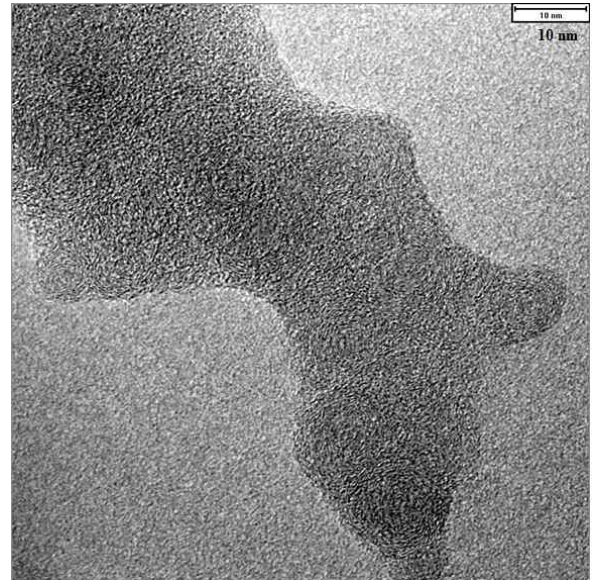


Fig. 6 Morphological characteristics of PM from the low temperature diesel combustion

디젤 연소에서 발생한 입자상 물질 형상을 보여 준다. 기존의 디젤 연소의 입자상 물질은 직경 약 25-35 nm로 이루어진 주요 입자로 구성되어 있는 것으로 알려져 있다 [4]. 저온 디젤 연소의 경우는 약 이보다 작은 직경의 주요 입자들로 구성되어 있는 것이 확인할 수 있었다. 문헌에 따르면 15 nm 정도로 알려져 있다 [6].

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지원 아래 산업원천기술 개발사업(10033392)의 일환으로 수행되었으며, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고 문헌

- [1] Johnson, T., "Vehicular Emissions in Review," SAE Int. J. Engines, Vol. 5, 2012, pp. 216-234
- [2] Akihama, K., Takatori, Y., Inagaki, K., Sasaki, S., Dean, A., "Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature," SAE Technical Paper, 2001, 2001-01-0655
- [3] Han, S., Shim, E., Jang, J., Park, J., Bae, C., Park, J., Kim, H., "Operating Range of Low Temperature Diesel Combustion with Supercharging," SAE Technical Paper, 2009, 2009-01-1440
- [4] Kolodziej, C., Wirojsakunchai, E., Foster, D., Schmidt, N., Kamimoto, T., Kawai, T., Akard, M., Yoshimura, T., "Comprehensive

Characterization of Particulate Emissions from Advanced Diesel Combustion,; SAE Technical Paper, 2007, 2007-01-1945

[5] Natti, K., Henein, N., Poonawala, Y., Bryzik, W., "Particulate Matter Characterization Studies in an HSDI Diesel Engine under Conventional and LTC Regime," SAE Technical Paper, 2008, 2008-01-1086

[6] Seong, H., Lee, K., Choi, S., Adams, C., Foster, D., "Characterization of Particulate Morphology, Nanostructures, and Sizes in Low-Temperature Combustion with Biofuels," SAE Technical Paper, 2012, 2012-01-0441

[7] Stratakis, G. A., Stamatelos, A. M., "Thermogravimetric analysis of soot emitted by a modern diesel engine run on catalyst-doped fuel," Combustion and Flame, Vol. 132, 2003, pp. 157-169

[8] Ahlström A. F., Odenbrand, C. U. I., "Combustion characteristics of soot deposits from diesel engines," Carbon Vol. 27, 1989, pp. 475-483