



디젤엔진의 PM/NO_x 저감을 위한 배기가스 후처리장치의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of an Aftertreatment System for PM/NO_x Reduction in Diesel Engines

유경현*† · 박종국**

Kyung-Hyun Ryu*† and Jong-Kuk Park**

(Received 14 May 2018, Revision received 03 July 2018, Accepted 04 July 2018)

Abstract: Due to the strengthened emission regulations on diesel engines, various emission reduction technologies have been studied to reduce the exhaust emissions of diesel engines such as particulate matters and nitrogen oxides. A new aftertreatment system as one of exhaust gas reduction technologies for diesel engines was developed by a company. In this study, the developed aftertreatment system was tested to evaluate the performance of the aftertreatment system in a single cylinder diesel engine. Engine test was carried out at an engine speed of 1400 rpm and the engine loads of BMEP 0, 0.1, 0.18, 0.37, and 0.55 MPa. The experiment results showed that the smoke and NO_x with a new aftertreatment system were reduced to 87.5% and 82.2% at the engine load of BMEP 0.18 MPa, respectively. However, with aftertreatment system total hydrocarbon was increased to 50% at the engine load of BMEP 0 MPa and the brake specific fuel consumption was deteriorated by 1.5% at low load conditions. CO was not affected by the aftertreatment system. The performance of aftertreatment system was not depended on the exhaust gas temperature.

Key Words : Aftertreatment System, Exhaust Emissions, Smoke, NO_x, Diesel Engine

1. 서 론

전세계적으로 문제되고 있는 광화학 스모그(photochemical smog) 및 산성비(acid rain) 등의 대기 오염물질이 주로 자동차 및 선박 등의 내연기관으로부터 기인한다^{1,2)}고 밝혀짐에 따라 선진국을 중심으로 대기 환경오염물질에 대한 배출 규제를 강화³⁾하고 있다. 특히 디젤기관은 가솔린기

관에 비교하여 상대적으로 낮은 연료소비율로 인해 이산화탄소 배출물이 적고 열효율이 높은 장점이 있음에도 불구하고 인체에 유해한 입자상물질(PM, particulate matters)과 질소산화물(NO_x, nitrogen oxides)을 배출시킴에 따라 심각한 규제의 대상이 되어 왔다. 따라서 많은 연구자들이 문제가 되고 있는 디젤기관의 유해배출물을 저감시키기 위한 다양한 저감기술들이 개발하여 왔

*† 유경현(교신저자) : 군산대학교 기계융합시스템공학부
 E-mail : khryu@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4871

**박종국 : Jtrust(주) 대표

*† Kyung-Hyun Ryu(corresponding author) : School of Mechanical Convergence System Engineering, Kunsan National University.

E-mail : khryu@kunsan.ac.kr, Tel : 063-469-4871

**Jong-Kuk Park : Jtrust Co.

고,^{4,14)} 그 결과, DOC(diesel oxidation catalyst), DPF(diesel particulate filter) 등과 같은 입자상물질 저감장치와 SCR(selective catalyst reduction)과 같은 질소산화물 저감장치 등이 다양하게 개발되어 보급되고 있는 실정이다.^{15,16)} 그러나 미세먼지 등의 대기오염 문제로 인해 육상 자동차용 디젤기관들에 대한 규제 뿐만 아니라 해상 선박용 기관에 대한 배출가스 규제가 갈수록 강화되고 있어 이에 대응할 수 있는 효과적인 저감기술을 개발할 필요가 있다. 특히 Figs. 1과 2에서와 같이 2020년에는 배출규제지역(ECA, Emission Control Areas)에서 선박용 엔진에서 배출되는 황산화물질(SOx, sulfur oxides)을 제어하기 위해 연료 중의 황함량을 0.1%로 강화시키고 있고, 질소산화물(NOx)을 3.4 g/kWh로 강화시킴에 따라 이들 배출가스를 획기적으로 저감시킬 수 있는 저감장치의 개발 및 보급이 지속적으로 필요한 실정이다.

이러한 일환으로 국내 Jtrust(주)에서는 선박용 디젤기관의 배기 배출물을 저감시키기 위하여 기존의 DPF나 SCR과는 다른 배기배출물 후처리장치를 개발하였다.

본 연구는 Jtrust(주)에서 개발한 배기가스 후처리장치의 유용성을 검증하기 위하여 실시하였으며, 배기가스 후처리장치의 장착 유무에 따른 배기가스 저감 특성을 고찰하고, 배기가스 후처리장치를 장착하였을 경우 디젤엔진의 성능에 미치는 영향을 파악하여 배기가스 후처리장치로서의 유효성 및 효과적인 후처리장치로서의 개발 방향을 제시하고자 한다.

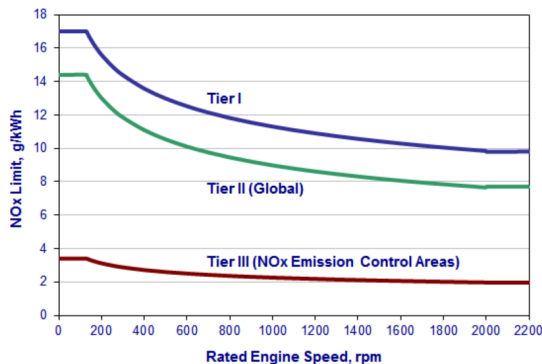


Fig. 1 MARPOL Annex VI NOx emission limits³⁾

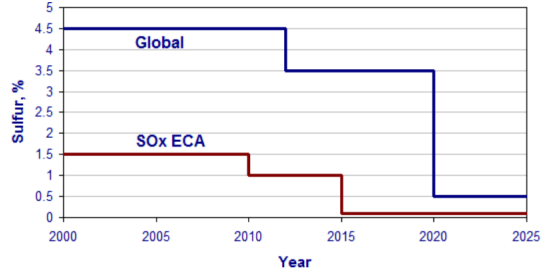


Fig. 2 MARPOL Annex VI fuel sulfur limits³⁾

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 실험 연료

본 연구에서는 배기가스 후처리시스템의 성능을 평가하기 위하여 단기통, 수냉식, 4행정 직접분사식 상용 디젤기관을 사용하였으며, 와전류형(eddy current type) 엔진 동력계(W130, Schenck, Darmstadt, Germany)를 이용하여 기관 부하와 회전속도를 제어하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 엔진의 주요 사양을 나타낸 것이다.

연료 분사시스템은 연료의 분사압력을 자유롭게 제어할 수 있도록 기존에 설치된 재래식 연료 분사펌프와 연료분사기를 제거하고, 1차 연료 공급펌프, 고압 연료펌프 및 커먼레일(common-rail) 압력제어기 등이 포함된 상용 커먼레일 시스템을 별도로 장착하였으며, 연료 분사기로는 7-hole 솔레노이드 인젝터를 사용하였다.

배기가스 후처리시스템의 장착으로 인한 엔진의 연소 특성의 변화를 고찰하기 위하여 실린더 헤드에 설치된 피에조 압력센서(6051B1, Kistler)를 이용하여 실린더내의 압력신호를 검출하고 charge amplifier(5015A, Kistler)와 DAQ 보드(PCI-6143, National Instrument)를 거쳐 압력을 측정하였다. 한편, 배기가스 성능을 평가하기 위하여 엔진동력계에 장착된 실험용 엔진의 배기다기관으로부터 후방 1.5 m 위치에 배기가스 후처리 시스템을 장착하고, 배기가스 후처리장치로부터 후방 2m의 위치에 배기가스 분석기(Vario plus, MRU)와 Opacimeter(OP-130, EplusT)를 설치하여 배기가스를 채취하고 분석하였다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

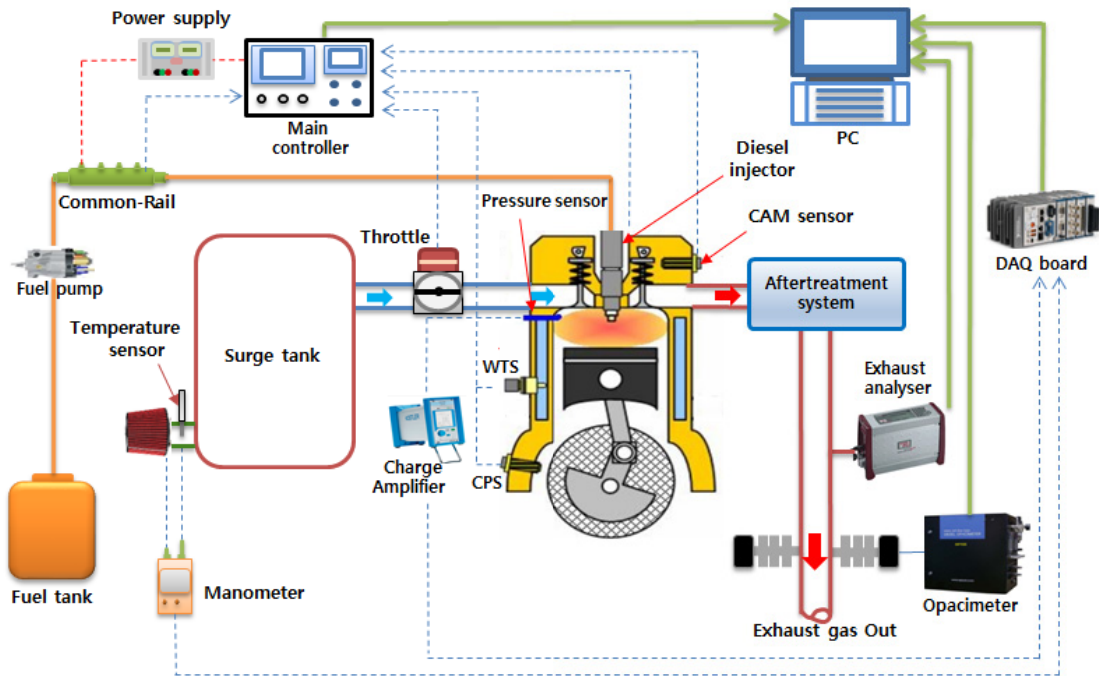


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification	Unit
Engine model	ND 130DI	-
Number of cylinder	1	-
Combustion chamber	DI	-
Bore × stroke	95 × 95	mm
Displacement volume	673	cc
Compression ratio	18	-
Max. Horse power	13/2400	PS/rpm
Max. Torque	42/2000	N·m/rpm
Injection timing	BTDC 17	°CA
Injection pressure	100	MPa
Coolant temperature	70±2	°C

Table 2는 실험에 사용된 경유의 물성치를 나타낸 것으로, 발열량은 43.116 MJ/kg인 8 ppm의 저유황경유를 사용하였다.

2.2 배기가스 후처리시스템

본 연구에 사용된 배기가스 후처리시스템은 란

Table 2 Properties of fuel used in this study

Item	Diesel fuel	Unit
Flash Point	72	PM, °C
Kinematic Viscosity	2.52	40 °C, mm ² /s
Sulfur	8	mg/kg
Cetane index	54	-
Density	826	15°C, kg/m ³
Lower Heating value	43.116	MJ/kg

탄족 회토류, 망간, 백금 등의 금속을 분말화하여 압출 성형기를 통해 펠릿으로 압출한 후 정립기 (marumerizer)를 이용하여 직경 12 mm 크기의 환형으로 성형한 다음, 1,200°C와 헬륨 분위기에서 소성한 촉매 담체를 직경 200 mm의 실린더에 적층한 형태의 시스템이며, 국내 Jturst(주)에서 선박용 엔진의 적용을 위해 개발한 것을 사용하였다. Fig. 4는 실제 실험에 사용된 배기가스 후처리 시스템 사진을 나타낸 것이다.



Fig. 4 Aftertreatment system used in this study

2.3 실험 방법

실험은 엔진 냉각수 온도는 $70\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 제어한 상태에서, 엔진 회전수 1,400 rpm에서 진행하였다. 배기가스 후처리시스템의 성능에 대한 배기가스 온도 영향을 고려하여 엔진부하를 제동 평균유효압력(brake mean effective pressure, BMEP) 0, 0.10, 0.18, 0.37, 0.55 MPa의 범위로 변화시켜 가면서 수행하였다.

한편, 배기가스 후처리시스템에 걸치는 배압(back pressure)을 고려하여 배기가스 후처리시스템의 전·후로 바이패스(by-pass)와 밸브를 설치하여 일정 이상의 배압이 발생할 경우 배기가스가 우회하도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔진 성능

Fig. 5는 1400 rpm의 엔진 회전속도와 BMEP 0.55 MPa에서 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 실린더 내의 압력을 나타낸 것이다. 배기가스 후처리시스템의 장착 유무와 상관없이 실린더 내의 압력선도는 거의 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 엔진 부하변화에 따른 도시평균유효압력(indicated mean effective pressure, IMEP)을 나타낸 것으로, 배기가스 후처리시스템을 장착할 경우

저부하에서 도시평균유효압력이 약간 낮게 나타났으나 엔진부하가 증가할수록 차이가 없었다.

또한 Fig. 7의 제동연료소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)을 살펴보면, 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우 제동연료소비율이 전체적으로 약간 증가하는 특성을 보임을 알 수 있었다. 이를 종합적으로 살펴볼 때, 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우, 후처리시스템에 걸리는 배압(back pressure)으로 인해 저부하에서 매우 미미하지만 미미한 출력 저하와 약 1.5%의 연비 성능 저하가 나타남을 알 수 있다.

한편, 배기가스 후처리시스템의 배기 성능에 영향을 미치는 배기가스 온도를 살펴본 결과, Fig. 8에 나타난 바와 같이 실험 조건에서 배기가스 후처리시스템의 장착 유무와는 상관없이 거의 비슷

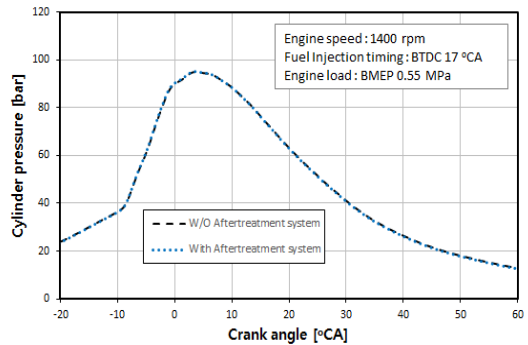


Fig. 5 Cylinder pressure with and W/O aftertreatment system

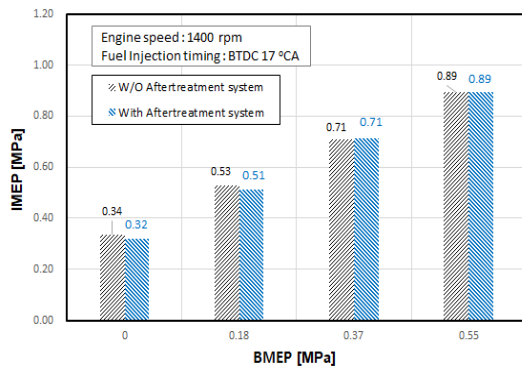


Fig. 6 IMEP with and W/O aftertreatment system

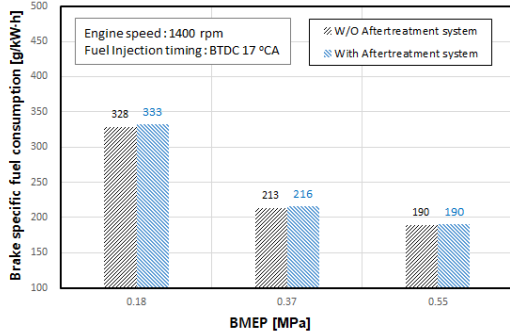


Fig. 7 Brake specific fuel consumption with and W/O aftertreatment system

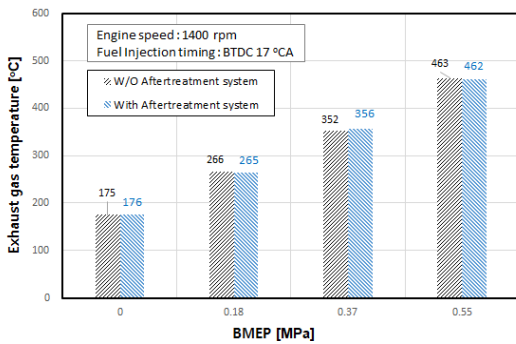


Fig. 8 Exhaust gas temperature with and W/O aftertreatment system

하게 나타났고, 제동평균유효압력(BMEP) 0.18 MPa 이후부터는 260 °C 이상의 온도를 보여 일정한 엔진 부하 조건 이상에서는 일반적인 촉매 활성화 온도 조건¹⁷⁾이 형성될 수 있음을 알 수 있었다.

3.2 배출가스 저감 성능

Fig. 9는 엔진 회전속도 1400 rpm과 엔진 부하 0.55 MPa에서의 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 매연 배출 특성을 나타낸 것이다. 매연은 전반적으로 엔진 부하가 증가할수록 증가하는 특성을 보였으며, 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우가 장착하지 않은 경우보다 더 적게 배출됨을 알 수 있었다. 매연 저감율의 경우, 무부하에서는 100% 저감된 반면, 엔진 부하가 BMEP 0.18, 0.37, 0.55 MPa로 증가함에 따라 저감량은 증가했지만 저감율은 각각 87.5%, 74%, 69%로 낮아짐을 알 수 있었다.

Figs. 10과 11은 엔진 회전속도 1400 rpm과 엔진 부하 0.55 MPa에서의 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 O₂와 CO₂의 배출 특성을 각각 나타낸 것이다. O₂는 엔진 부하가 증가할수록

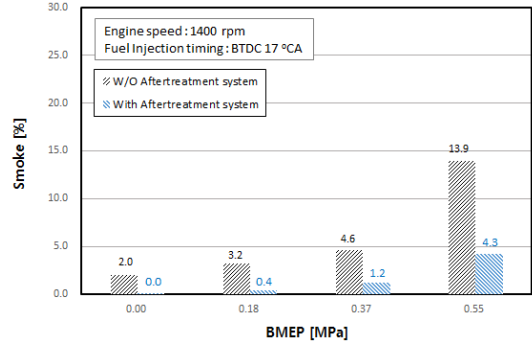


Fig. 9 Smoke emissions with and W/O aftertreatment system

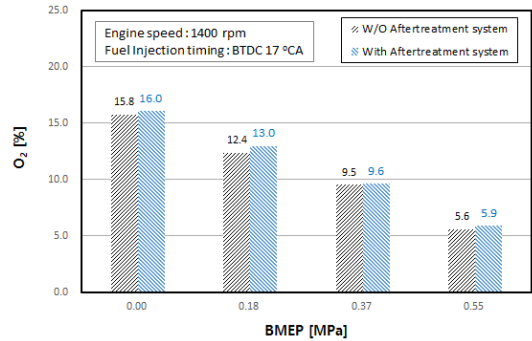


Fig. 10 O₂ emissions with and W/O aftertreatment system

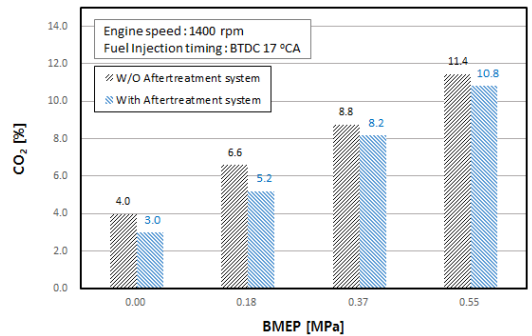


Fig. 11 CO₂ emissions with and W/O aftertreatment system

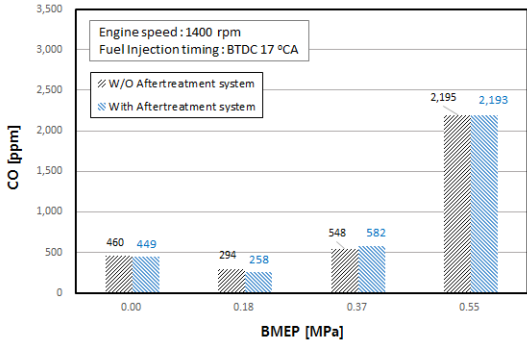


Fig. 12 CO emissions with and W/O aftertreatment system

전체적으로 감소한 반면, CO₂는 전체적으로 증가하는 전형적으로 상반된 배출특성을 보였으나, 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우가 장착하지 않은 경우보다 O₂는 약간 증가하고, CO₂는 감소하는 특성을 나타내었다.

Fig. 12는 엔진 회전속도 1,400 rpm과 엔진 부하 0.55 MPa에서의 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 CO의 배출 특성을 나타낸 것이다. CO의 경우도, 고부하에서 크게 증가하는 전형적인 배출 특성을 보인 상태에서 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우가 장착하지 않은 경우와는 큰 차이가 없었다. 이를 통해 Fig. 10에서 살펴본 것처럼 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우가 배기가스 내에 더 많은 산소함량을 가지고 있었음에도 CO 배출량이 크게 감소하지 않은 것을 볼 때 실험에 사용된 배기가스 후처리시스템은 CO의 저감 성능에는 큰 효과가 없었음을 알 수 있다.

Fig. 13은 엔진 회전속도 1400 rpm과 엔진 부하 0.55 MPa에서의 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 NOx의 배출 특성을 나타낸 것이다.

배기가스 후처리시스템을 장착한 경우, 장착하지 않은 경우보다 NOx를 크게 감소한 것을 알 수 있으며, 엔진 부하가 BMEP 0, 0.18, 0.37, 0.55 MPa로 증가함에 따라 NOx 저감율 각각 81.6%, 82.2%, 35%, 32%로 나타나 배기가스 온도가 낮은 저부하에서 저감율이 크게 나타났고 배기가스 온도가 265°C에서 가장 큰 저감율을 보였다. 한편, NOx를 NO와 NO₂로 구분하여 볼 때 Fig. 14에서

알 수 있는 것처럼, NO가 무부하에서 최대 83%의 감소율을, NO₂가 BMEP 0.18 MPa에서 최대 79%의 저감율을 나타낸 반면, 정량적인 저감량에 있어서는 대부분 NO에서 저감됨을 알 수 있었다. 이는 NO가 N₂와 O₂로 환원되어 Fig. 10에서 나타난 배기가스 내의 산소량을 증가시킨 것으로 분석되며, 이를 통해 배기가스 후처리시스템이 NOx의 저감 성능에는 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.

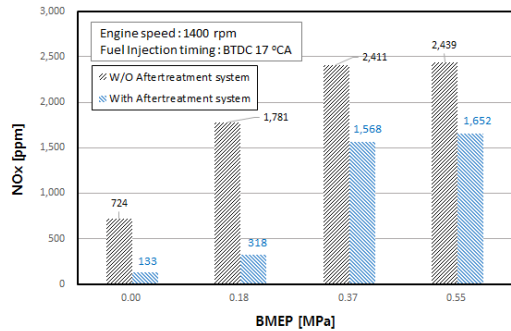


Fig. 13 NOx with and W/O aftertreatment system

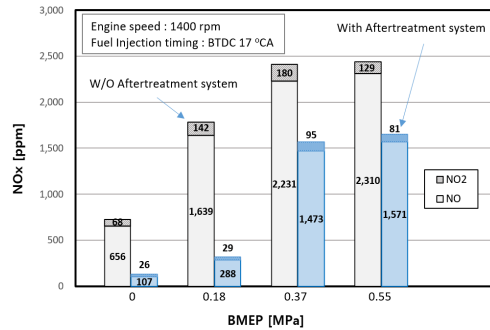


Fig. 14 NOx with and W/O aftertreatment system

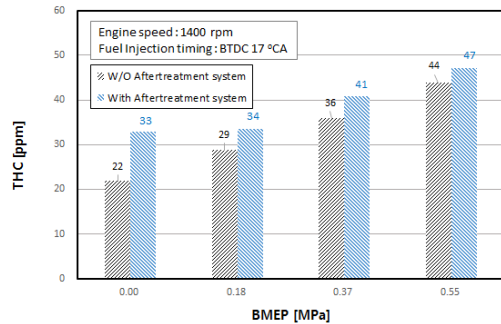


Fig. 15 Total hydrocarbon with and W/O aftertreatment system

한편, Fig. 15는 엔진 회전속도 1,400 rpm과 엔진 부하 0.55 MPa에서의 배기가스 후처리시스템의 장착 유무에 따른 총탄화수소(total hydrocarbon, THC) 배출물 특성을 나타낸 것이다. 엔진 부하가 증가할수록 THC는 증가하는 전형적인 특성을 보이지만, 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우에 THC 배출량이 무부하에서 최대 50%까지 증가하는 것으로 나타나 배기가스 후처리시스템이 THC의 배출에는 역효과가 있음을 알 수 있다.

이상을 종합하여 볼 때, 디젤엔진의 배기가스 후처리시스템으로 개발된 시제품은 매연과 NOx의 배출 성능에는 효과가 있지만 THC에는 역효과가 있음을 알 수 있었고, 배기가스 온도의 증가가 NOx 및 매연의 저감 성능에는 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

4. 결 론

디젤엔진의 배기가스 저감을 위한 후처리시스템의 배출가스 저감성능을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 배기가스 후처리시스템을 장착한 경우, 엔진 미미한 출력 성능 감소와 1.5%의 연비 성능 저하가 있음을 알 수 있었다.

2) 배기가스 후처리시스템은 매연과 NOx의 배출을 각각 최대 87.5%와 82.2% 저감시킴에 따라 매연과 NOx의 동시 저감에 효과적임을 알 수 있었다.

3) CO의 경우 배기가스 후처리시스템을 통하여 큰 저감 효과를 얻을 수 없었으나, THC은 6.8~50% 증가하는 배출 특성을 보여 후처리시스템의 개선이 필요함을 알 수 있었다.

4) 배기가스 후처리시스템의 성능은 배기가스 온도에 따라 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있었다.

상기를 종합하여 볼 때, 개발된 배기가스 후처리시스템은 디젤기관의 매연과 NOx의 저감에 효과적인 것으로 판단되나, 최적의 저감 성능을 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합기반구축사업의 “중소형 선박엔진 및 관련 기자재 공인시험인증센터 구축” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. R. de Abrantes, J. V. de Assuncao, and C. R. Pesquero, 2004, "Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Light-Duty Diesel Vehicles Exhaust", Atmospheric Environment, Vol. 38, pp. 1631-1640.
(DOI:10.1016/j.atmosenv.2003.11.012)
2. I. A. Reşitoğlu, K. Altınışik and A. Keskin, 2015, "The Pollutant Emissions from Diesel-Engine Vehicles and Exhaust Aftertreatment Systems", Clean Technologies and Environmental Policy, Vol. 17, pp. 15-27.
(DOI:10.1007/s10098-014-0793-9)
3. www.dieselnet.com, IMO Marine Engine Regulations. (DOI:10.1007/s10098-014-0793-9)
4. J. G. Nam and J. Y. Choi, 2003, "A Study for NOx Discharge Characteristics of Diesel Engines", Journal of the Korean Society of Marine Engineering", Vol. 27, No. 3, pp. 373-380.
5. S. W. Ki and S. S. Choi, 2010, "An Experimental Study on the Smoke Reduction System of the Exhaust Gas Suction Type", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 34, No. 6, pp. 833-839.
6. S. K. Huh, 2007, "A Study on the Exhaust Gas Decreasing System", Journal of the Korean Institute of Plant Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 57-65.
7. C. S. Yi and C. W. Lee, 2017, "A Study on the Exhaust Gas After Treatment for Small Ship", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 3, pp.

- 76-81. (DOI:10.14775/ksmpe.2017.16.3.076)
8. Y. H. Ryu, T. W. Kim, J. S. Kim and J. G. Nam, 2017, "Experimental Study of NOx Reduction in Marine Diesel Engines by using Wet-type Exhaust Gas Cleaning System", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 3, pp. 216-221. (DOI:10.5916/jkosme.2017. 41.3.216)
 9. K. H. Ryu, 2012, "A Study on the PCD Plasma System as an After Treatment Apparatus in Diesel Engine", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 20, No. 2, pp.70-77. (DOI:10.7467/KSAE.2012.20.2.070)
 10. D. S. Baik, 2006, "The Performance Test on A Continuous Regeneration DPF in A HD Diesel Engine", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 7, No. 5, pp. 788-792.
 11. H. J. Kim, J. W. Chung, J. H. Kang, J. W. Lee and J. S. Park, 2016, "Study on the High Efficiency Cleaning Performance of the Diesel Vehicle DPF", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 3, pp. 163-170. (DOI:10.5762/KAIS.2016.17.3.163)
 12. S. H. Jung, T. Y. Jeong and S. C. Hwang, 2015, "Performance Evaluation of SCR System for Generator Engine on Training Ship KAYA", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 68-74. (DOI:10.9726/kspse.2015.19.6.068)
 13. H. S. Lee, K. H. Kim, S. H. Jung and D. K. Koh, 2013, "An Experimental Study on the Smoke Filtration System Using Water Injection and Vacuum Pump driven by Exhaust Gas", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 17-22. (DOI:10.9726/kspse.2013.17.3.017)
 14. C. K. Seo and J. Y. Bae, 2015, "De-NOx Characteristics of V₂O₅ SCR according to the Ratio of TiO₂ Crystal Structures", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 26-32.
 15. J. I. Jeong, 2014, "Trend of Diesel Vehicle Particulate Filter Trap Technology", KSAE 2014 Annual Conference, pp. 1507-1537.
 16. G. K. Yeo, 2002, "Trend of Automotive Catalyst Technologies for Low Emission Vehicles", Auto Journal, Vol. 2, pp. 28-32.
 17. W. S. Kang, 2015, "A study on Hybrid Catalytic Converter System for Simultaneous Reduction of PM and NOx", PhD thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.