

산업용 디젤엔진의 후처리장치 단열에 따른 질소산화물 저감특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristics of Nitrogen Oxide Reduction according to Thermal Insulation of After-treatment System of Industrial Diesel Engines

강석호*† · 박은용** · 권오현*** · 김훈명**** · 강정호*****
Seok-Ho Kang*† , Eun-Yong Park** , Oh-Hyun Kwon*** ,
Hoon-Myung Kim**** and Jeong-Ho Kang*****

(Received 31 August 2020, Revision received 30 November 2020, Accepted 3 December 2020)

Abstract : It is a well-known fact that a urea-SCR system is a highly efficient after-treatment system for NO_x reduction; however, it is advisable to reduce the time to reach the light-off temperature due to its sensitivities to the exhaust gas temperature. Therefore, an experimental study was conducted on the reduction of the time to reach the light-off temperature through the application of the thermal insulation on the after-treatment system and the resulting NO_x reduction efficiency. The engine used in this study is a 74 kW diesel engine with a displacement of 3.8 liters, a common rail fuel injection system was applied, and the after-treatment system was composed of DOC, DPF, SCR and AOC. Every performance test was conducted on the non-road diesel engine's certification test mode, NRTC mode, and the identical after-treatment systems and engines were used on the test except for the application of insulation. As a result, through the application of insulation on the after-treatment system, the temperature rise time of the SCR catalyst was shortened which made it possible to reach the urea injection start point more quickly, and the NO_x emission was reduced. In addition, the rise of the SCR catalyst temperature by the applied insulation made the reduction reaction by NH₃ adsorbed on the catalyst in the low-temperature section activated which led to an 10.54% increase of NO_x reduction efficiency.

Key Words : Diesel engine, Nitrogen oxides, Urea-SCR system, Insulation, Exhaust gas temperature

*† 강석호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1785-2272) :
선임연구원, 건설기계부품연구원 친환경에너지연구실
E-mail : shkang@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2542
**박은용(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2504-132X) :
소장, ㈜테스크 기술연구소
***권오현(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2655-2992) :
과장, 대동공업(주) 엔진개발팀
****김훈명(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8885-0311) :
연구원, 한국자동차연구원 동력성능연구센터
*****강정호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8309-5345) :
센터장, 한국자동차연구원 동력성능연구센터

*† Seok-Ho Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1785-2272)
: Senior Researcher, Green Energy System Lab, Korea
Construction Equipment technology Institute.
E-mail : shkang@koceti.re.kr, Tel : 063-447-2542
**Eun-Yong Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2504-132X)
: Chief Technology Officer, R&D Center, TESK.
***Oh-Hyun Kwon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2655-2992)
: Manager, Engine Development Team, Daedong Industrial.
****Hoon-Myung Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8885-0311)
: Researcher, Powertrain Efficiency R&D Center, Korea
Automotive Technology Institute.
*****Jeong-Ho Kang(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8309-5345)
: Director, Powertrain Efficiency R&D Center, Korea
Automotive Technology Institute.

1. 서 론

건설기계 및 농기계 등의 비도로용차량은 작동 특성 및 사용조건 특수성 등으로 인해 전통적으로 디젤엔진이 주력으로 사용되어 왔다. 비도로용차량은 대기환경개선을 위해 EV, FCEV 등의 보급이 활발히 이루어지고 있는 도로용차량 분야와 다르게 전동화차량의 보급이 쉽지 않은 분야이며, 이에 따라 내연기관을 기반으로 한 친환경 기술의 지속적 개발 및 적용이 필요한 분야이다.

디젤엔진은 높은 열효율을 바탕으로 낮은 연료소모량과 이산화탄소 배출량이 적다는 장점을 가지나 인체에 유해한 입자상물질과 질소산화물을 다량으로 배출시키는 것으로 알려져 지속적으로 배기규제가 강화되고 있는 실정이다.^{1),2)}

현재 산업용 디젤엔진에 적용되는 배기규제는 미 연방정부의 Tier-4 final, 유럽연합의 Stage-V 등이 존재하며 국내의 경우 미국의 Tier 규제와 동등한 규제치를 유예기간을 두고 도입하고 있다. 가장 최근 도입된 배기규제인 유럽연합의 Stage-V 규제내용을 살펴보면 전단계인 Stage-IV에 적용되지 않았던 PN규제가 도입되어 19 kW 이상 560 kW 미만 엔진에 대해 1×10^{12} /kWh로 제한하고 있으며, 이동식 배출가스 측정기를 활용한 실작업 조건에서의 배출물 측정결과를 인증기관에 제출하도록 되어 있다. 또한 56 kW 이상 560 kW 이하 엔진에 대한 PM 배출허용치가 0.025 g/kWh에서 0.015 g/kWh로 60% 강화됨에 따라 이에 따른 대책이 요구되고 있는 상황이다.^{3),4)}

이는 미국의 Tier-4 final 규제와 비교 시 NO_x, CO, THC에 대한 규제치는 유사한 수준이나 상대적으로 입자상물질에 대한 규제가 강화된 것으로 해석할 수 있으며, 이에 기존에 DPF 없이 규제치를 만족시키던 제작사들도 DPF를 적용할 수밖에 없는 상황이다. 제작사 입장에서는 DPF 적용에 따른 배기계 길이의 증가로 배기온도 저하에 따른 SCR에서의 NO_x 저감효율 감소에 대한 대책을 마련해야 하는 상황이다.

Urea-SCR system은 높은 NO_x 저감효율을 갖는 시스템이지만, 배기온도에 민감한 시스템으로

LOT(Light-off-Temperature)에 도달하는 시간을 줄이는 것이 매우 중요하다.⁵⁾ Urea-SCR system의 NO_x 정화효율에 영향을 미치는 주요인자로는 배출가스 온도, 공간속도 NH₃/NO_x ratio, NO₂/NO_x ratio 등이 있으며,⁶⁻¹¹⁾ 특히 배기온도에 절대적인 영향을 받기 때문에 일부 제작사들은 냉간시 축매온도를 빠르게 올리기 위해 Post injection을 추가하기도 하지만, 이는 연료소모량 증가의 원인이 되기도 한다.¹²⁾ 산업용 디젤엔진의 인증기준을 살펴보면 Transient cycle인 NRTC (Non-Road Transient Cycle)에 대해 냉간 및 열간상태에 대해 각각 시험을 진행하고 이에 가중치를 곱해 최종 배출량이 산정된다. 또한 냉간조건 시험 이후 20분의 Soaking 이후 열간상태 시험이 진행되기 때문에 후처리장치의 온도유지능력에 따라 배출량에 큰 차이를 보인다. 이에 본 연구에서는 후처리 시스템 단열에 따른 LOT 도달시간 단축, 온도유지능력 및 이에 따른 NO_x 저감효율에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

후처리장치 단열에 따른 LOT 도달시간, 온도유지능력 및 NO_x 저감성능을 시험을 통해 분석하고자 AVL社의 350 kW급 AC 엔진동력계와 Horiba社의 MEXA-9100DEGR 배출가스 분석기를 사용하였으며, NO_x 분석은 화학발광법(Chemiluminescence detector : CLD)을 채택하고 있다.

보조장비로 흡기유량계, 연료유량계, 냉각수 온도 조절장치, 인터쿨러 냉각장치가 사용되었으며, 배출가스 샘플포트는 SCR 후단에 설치하였다. Fig. 1은 전체 시험장치의 개략도를 나타낸다.

2.1 대상엔진 및 후처리장치

본 연구에 사용된 엔진은 배기량 3.8리터의 74 kW급 디젤엔진이며, 커먼레일 방식의 연료분사 시스템이 적용되어 있다. Table 1은 대상엔진의 주요 제원을, Fig. 2에 대상엔진의 외형을 나타내었다.

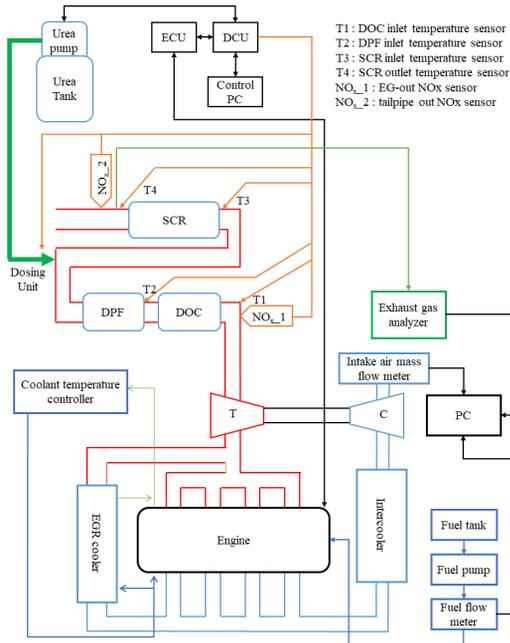


Fig. 1 Schematic diagram of the engine test bench

Table 1 Specifications of the test engine

Engine type	4-stroke CRDI Diesel
Number of cylinder	4
Bore × Stroke(mm)	103 × 115
Displacement volume(cc)	3,833
Compression ratio	17:1
Max. power(kW/rpm)	74.5/2,200
Max. torque(Nm/rpm)	442/1,400

대상엔진에 적용된 배기후처리장치는 DOC + DPF + SCR + AOC의 구성이며, SCR 촉매 2개 중 후단촉매의 끝단 1inch에 AOC가 zone coating되어 있는 구조이다. Urea dosing system은 펌프 내장형 Urea tank와 배기관에 Urea를 분사할 수 있는 Dosing unit, Dosing system을 제어하는 DCU로 구성되어 있다. NO_x sensor는 DOC 전단 및 SCR 후단에 각각 장착되어 있으며, SCR 전·후단에 각각 온도센서가 장착되어 센서 장착부의 배출가스 온도를 나타내고 있다. DCU는 엔진 ECU와 CAN통신이 가능하여 DOC, DPF 온도, 엔진회전속도,



Fig. 2 Photograph of the test engine

Table 2 Specifications of the catalyst

	Material	Size (inch)	Cell structure
DOC	Cordierite	8 × 5.3	400cps/4mil
DPF	SiC	8 × 8	300cps/12mil
SCR1	Cordierite	8 × 5.3	400cps/4mil
SCR2		8 × 2.8	
AOC		8 × 2.5	

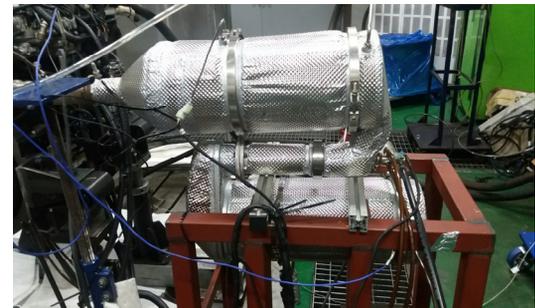


Fig. 3 Photograph of the After-treatment system

연료분사량 및 배기유량 등은 엔진 ECU에서 CAN통신을 통해 DCU로 전송된다. Table 2에 후처리장치의 상세제원을, Fig. 3에 후처리장치의 외형을 나타내었다.

2.1.1 후처리장치 단일재

본 연구에서 사용된 단일재는 E-Glass fiber로 10 mm 두께로 후처리장치를 감싼 후 SUS304 재료의 엠보싱박판을 0.15 mm의 두께로 제작하여

단열재를 덮은 상태로 적용하였다. E-Glass fiber는 SiO₂ 54%, Al₂O₃ 15%, CaO 12%로 구성되어 있으며, 내열온도는 650℃, 비열은 805 J/kg.K, 열전도율은 1.35 W/m.K로 배기관 단열재로 적합한 물성치를 가지고 있다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 단열재 적용을 제외한 모든 사양이 동일한 후처리장치와 엔진을 통해 각각 성능시험을 진행하였다. 산업용 디젤엔진의 인증시험모드인 NRTC mode을 통해 진행하였으며, Fig. 4는 NRTC mode의 엔진회전속도 및 토크를 나타낸다. NRTC mode 시험은 제작자동차 시험검사 및 절차에 관한 규정 별표 11의2의 시험실 온도 및 소킹시간 등을 준수하여 시험을 수행하였다.

일차적으로 Urea dosing을 실시하지 않은 상태에서의 각 촉매 전단의 온도 및 NO_x 배출량을 측정·분석하였으며, Urea dosing을 실시한 상태에서 시험 데이터의 신뢰성 확보를 위해 시험조건 별로 각각 3회씩 NRTC mode 시험을 실시하여 데이터를 분석하였다.

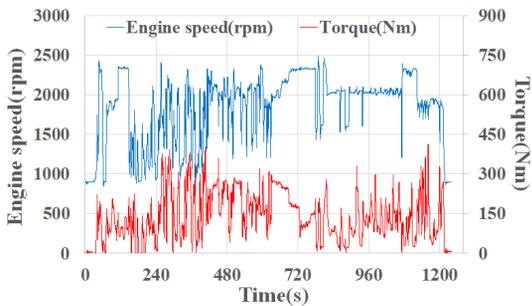


Fig. 4 Engine speed & torque Variation on the NRTC test mode

3. 실험결과

3.1 단열여부에 따른 각 촉매별 온도분석

일차적으로 Urea dosing을 실시하지 않은 상태에서 NRTC mode에서의 엔진회전속도 및 부하변동에 따른 각 촉매의 온도 및 NO_x 배출량을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

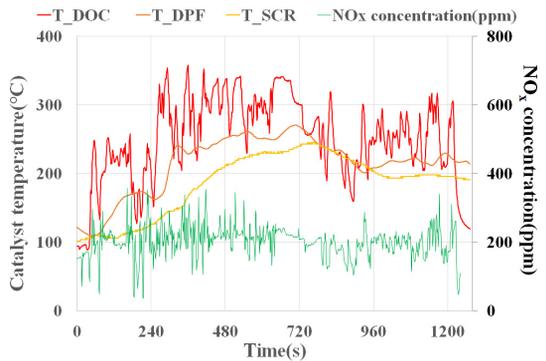


Fig. 5 DOC, DPF, SCR temperature & NO_x concentration without urea dosing on the NRTC mode

모드 진입시점의 촉매온도를 살펴보면, DOC 94.5℃, DPF 121.5℃, SCR 101.37℃이며, 후처리장치 레이아웃 상 DOC가 배기매니폴드와 가장 가까운 거리에 위치함에 따라 부하변동에 따른 온도변화폭이 가장 크게 나타나고, 싸이클 운전 중 측정되는 온도 또한 가장 높음을 확인할 수 있다.

반대로 배기매니폴드와의 거리가 가장 먼 SCR의 경우 온도변화폭이 적게 나타나며 전반적인 온도분포 또한 가장 낮음을 확인할 수 있다.

NO_x 농도를 살펴보면 240~400초 부근의 부하변동이 크게 나타나는 구간에서 NO_x 농도가 높게

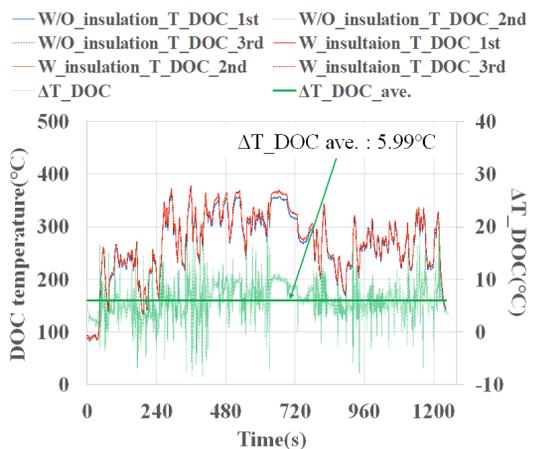


Fig. 6 DOC temperature (without & with insulation) & temperature variation on the NRTC mode

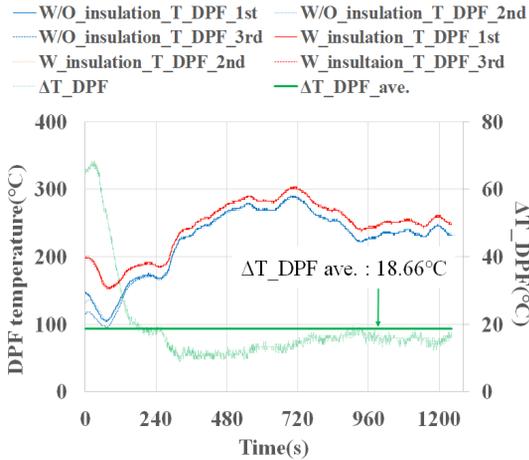


Fig. 7 DPF temperature (without & with insulation) & temperature variation on the NRTC mode

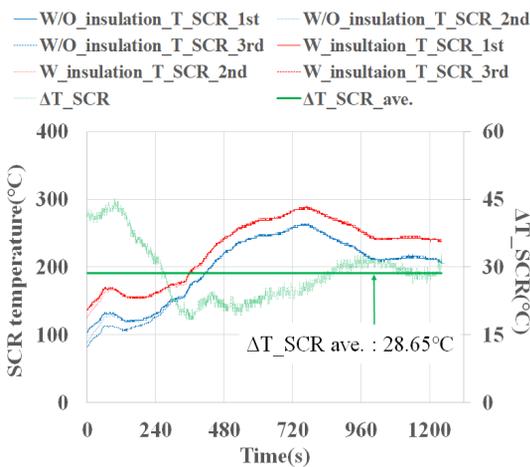


Fig. 8 SCR temperature (without & with insulation) & temperature variation on the NRTC mode

나타나고 농도의 변동폭 또한 크게 나타나는 것으로 판단되며, 630초 이후 엔진회전속도의 변동이 작게 나타나는 구간에서는 상대적으로 NO_x 농도가 낮게 측정되었다. 400초 부근의 SCR 온도는 180°C 정도로 SCR의 NO_x 저감효율이 높지 않은 구간이기 때문에 NRTC mode 상에서의 NO_x 배출량 저감을 위해서는 400초 이전 구간의 NO_x 배출량을 저감시키는 것이 중요할 것으로 판단된다.

Fig. 6~8은 NRTC mode 상에서 단열유무에 따

른 DOC, DPF, SCR의 온도 및 온도차를 나타내고 있다. 각 조건별로 3회씩 시험을 수행하였으며, 각 시험 케이스 별 온도차차는 미비하게 나타났다. 단열유무에 따른 평균온도차는 DOC 5.99°C, DPF 18.66°C, SCR 28.65°C로 나타났으며, 배기매니폴드와의 거리가 멀수록 단열에 따른 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다.

특히 NO_x 저감효율에 직접적인 영향을 미치는 SCR 촉매의 온도상승추이를 살펴보면 단열재가 적용되지 않은 조건에서는 356초 부근에서 Urea 분사시점에 도달하며, 510초 부근에서 NO_x 저감효율이 90%에 초과하는 230°C에 도달함을 확인할 수 있다. 단열재가 적용된 조건의 경우 278초 부근에서 Urea 분사시점에 도달하며, 445초 부근에 230°C에 도달함을 확인할 수 있다. 또한 모드 진입시점에서의 SCR 촉매의 온도가 단열여부에 따라 41°C 가량이 차이가 발생함으로써 단열 적용 조건에서 촉매활성화시간이 단축되고 그에 따라 NO_x 저감효율 또한 상승할 것으로 판단된다.

3.2 단열여부에 따른 NO_x 저감효율 및 Urea 분사량 분석

Fig. 9는 단열유무에 따른 SCR 후단에서의 NO_x 농도를 나타낸다. 단열유무에 따라 각각 3회씩 시험을 실시하였으며, 시험 결과, NO_x 배출량은 일정하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 시험결과를 살펴보면 단열유무에 관계없이 720초 이후 구간에서의 NO_x 농도는 0 ppm에 수렴하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 8에서 이 구간에서의 SCR 촉매온도를 살펴보면, 단열 미적용 조건은 255°C, 단열 적용조건은 282°C로 단열유무와 관계없이 SCR 촉매가 최대의 효율을 나타낼 수 있는 온도에 도달해 있음을 확인할 수 있다. 촉매온도가 200°C 미만에 해당되는 구간은 단열 미적용 조건의 경우 모드 진입 이후 440초까지의 구간이며, 단열적용조건은 370초까지의 구간이다. 이에 따라 단열적용조건에서 SCR 촉매의 온도상승시간이 단축되기 때문에 NO_x 저감효율이 더 높게 나타날 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 200°C 미만에 해당되는 구간에서도 SCR 촉매에 흡착된 NH₃에

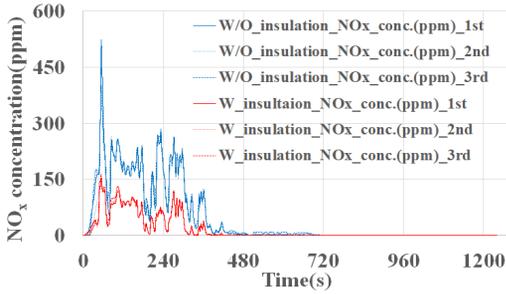


Fig. 9 NO_x emission without & with insulation on the NRTC mode

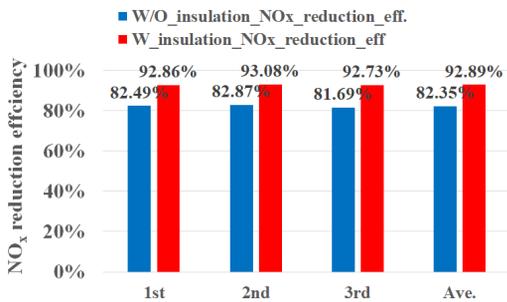


Fig. 10 NO_x reduction efficiency without & with insulation on the NRTC mode

의한 NO_x 환원반응이 발생되며, 이 또한 SCR 촉매온도에 따라 반응율의 차이가 발생하기 때문에 단열 적용조건에서 더 낮은 NO_x 농도를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 단열유무에 따른 NRTC mode 상에서의 NO_x 저감효율을 나타낸다. 각 시험 케이스 별 오차는 최대 1.18%로 나타났으며, 단열 미적용 조건인 경우 평균 82.35%, 단열 적용조건은 평균 92.89%로 후처리장치 단열에 의해 10.54%의 NO_x 저감효율이 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 단열유무에 따른 Urea 분사량을 나타낸다. Urea 분사시작 시점을 살펴보면 단열 미적용 조건에서는 356초 부근에서, 단열 적용조건에서는 278초 부근에서 Urea 분사가 시작됨을 확인할 수 있다. 배기관의 온도가 낮은 상태에서 Urea 분사가 시작될 경우 NH₃ 생성반응이 정상적으로 이루어지지 않아 제어정밀도가 떨어지며, 배기관 및 Urea dosing unit에 퇴적물이 고착될 가능성이

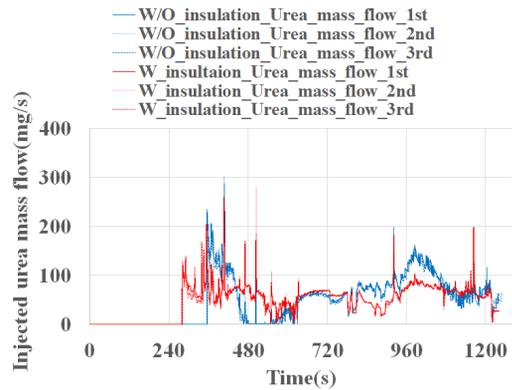


Fig. 11 Urea mass flow emission without & with insulation on the NRTC mode

존재한다. 이에 본 연구에 적용된 Urea 분사 제어 알고리즘에서는 Urea의 가수분해 및 열분해가 정상적으로 이루어지는 일정 이상의 온도에서 Urea 분사가 수행되도록 제어하고 있으며, 그로인해 단열재 적용조건에서 Urea 분사 시작시점에 빠르게 도달한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 후처리장치의 단열에 따른 Urea-SCR system의 질소산화물 저감특성을 분석하고자 74 kW급 산업용 디젤엔진에 단열 전·후의 후처리장치의 온도 및 질소산화물 배출량을 NRTC 모드 상에서 분석하였으며, 이에 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 단열유무에 따른 각 촉매별 평균 온도차는 DOC 5.99℃, DPF 18.66℃, SCR 28.65℃로 나타났으며, 배기매니폴드와의 거리가 멀수록 단열에 따른 효과가 크게 나타나는 것을 확인하였다. 특히 일정 시간 Soaking 후 시동 시 단열에 따른 온도차가 크게 나타남을 확인하였다.

2) 후처리장치 단열 적용에 따라 SCR 촉매의 온도상승시간이 단축되며, 이에 따라 Urea 분사시작시점에 빠르게 도달할 수 있음을 확인하였으며, 촉매활성화온도에 도달하는 시간이 감소됨에 따라 NO_x 배출량 또한 저감되는 것을 확인하였다.

3) SCR 촉매온도 200℃ 미만에 해당되는 구간에서도 SCR 촉매에 흡착된 NH₃에 의한 NO_x 환원 반응이 발생되며, 이 또한 SCR 촉매온도에 따라 반응율의 차이가 발생하기 때문에 단일 적용조건에서 더 낮은 NO_x 농도를 보이는 것을 확인하였다.

4) NO_x 저감효율 분석 결과 단일 미적용 조건의 경우 평균 82.35%, 단일 적용조건은 평균 92.89%로 후처리장치 단열에 의해 10.54%의 NO_x 저감효율이 증가함을 확인하였으며, 후처리장치 단열성능에 따라 SCR 촉매의 NO_x 저감효율이 상승할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 산업기술혁신사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (10077690, Post Tier-4 대응 100마력급 비도로용 디젤엔진 질소산화물 저감용 우레아 공급 시스템 개발).

Author contributions

S. H. Kang; Study conceptualization. E. Y. Park; Development of After-treatment system. O. H. Kwon; Development of Test engine. H. M. Kim; Engine dynamometer test. J. H. Kang; Data analysis.

References

1. K. H. Ryu and J. K. Park, 2018, "A Study on the Development of an Aftertreatment System for PM/NO_x Reduction in Diesel Engines", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 22, No. 4, pp. 47-54. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.047>)
2. K. H. Ryu and J. G. Won, 2019, "Effects of Compression Ratio on the Performance and Combustion Characteristics of Diesel-CNG Dual Fuel System in a Diesel Engine", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 39-48. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.4.039>)
3. D. S. Kim and T. J. Wang, 2017, "Diesel Engine Technologies for Next-generation Stage V Emission Regulation", *Auto Journal*, Vol. 39, No. 10, pp. 25-30.
4. D. S. Kim and D. I. Lee, 2014, "Emission Regulation and Technology Trends on Off-highway Vehicles/Equipments", *Auto Journal*, Vol. 36, No. 5, pp. 16-21.
5. J. C. Kim, 2016, "Urea-Selective Catalyst Reduction System", *Auto Journal*, Vol. 38, No. 5, pp. 37-41.
6. S. H. Kang, 2016, "A Study on Prediction Model Development of Nitrogen Oxide for Passenger Diesel Engine", Ph. D. Dissertation, Kookmin University, Seoul, Korea.
7. M. Koebel, M. Elsener and G. Madia, 2001, "Recent Advances in the Development Urea-SCR for Automotive Applications", *SAE Technical Paper*, 2001-01-3625. (<https://doi.org/10.4271/2001-01-3625>)
8. S. G. Lee, S. W. Lee and Y. S. Kang, 2015, "Development and Validation of Urea-SCR Control-Oriented Model for NO_x and NH₃ Slip Reduction", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-9. (<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.1.001>)
9. I. Nova, C. Ciardelli, E. Tronconi, D. Chatterjee and M. Weibel, 2007, "NH₃-NO/NO₂ SCR for Diesel Exhausts After treatment: Mechanism and Modelling of a Catalytic Converter", *Topics in catalysis*, Vol. 42, pp. 43-46. (10.1007/s11244-007-0148-4)
10. S. C. Jung and W. S. Yoon, 2008, "The Effect of an Oxidation Precatalyst on the NO_x Reduction by NH-SCR Process in Diesel Exhaust", *Transaction of the KSAE*, Vol. 16, NO. 5, pp. 68-76. (<https://doi.org/10.1021/ie0200555>)

11. Y. Y. Ham and S. Y. Park, 2016, "A Study of NH₃ Adsorption/Desorption Characteristics and Model Based Control in the Urea-SCR System", Transaction of KSAE, Vol. 24, No. 3, pp. 302-309.
(<https://doi.org/10.7467/KSAE.2016.24.3.302>)
12. S. Stadlbauer, H. Waschl, A. Schilling and L. Re, 2013, "DOC Temperature Control for Low Temperature Operating Ranges with Post and Main Injection Actuation", SAE Technical Paper.
(<https://doi.org/10.4271/2013-01-1580>)