

비도로용 디젤엔진의 분사시기 및 인젝터 변경에 따른 배출가스 특성 연구

김훈명^{*†} · 강정호^{*} · 한다혜^{*} · 정학섭^{**} · 표수강^{**} · 안중규^{***}

^{*}자동차부품연구원 · ^{**}국제중합기계 · ^{***}한국기술교육대학교

Effect of Injection Timing and Injector Hole Number on Emission Characteristics for Off-road Diesel Engine

Hoon Myung Kim^{*†}, Jeong Ho Kang^{*}, Da Hye Han^{*}, Hak Sup Jung^{**}, Su Kang Pyo^{**} and Jueng Kyu Ahn^{***}

^{*}KATECH, ^{**}Kukje machinery company, ^{***}Korea University of Technology and Education

(Received 20 February 2014, Received in revised form 16 March 2014, Accepted 18 March 2014)

ABSTRACT

Environmental regulations are being reinforced for the solution of environmental pollution, that are global issues. Exhaust gas regulations of off-road engines also demand stepwise reduction emission from beginning of Tier 4 interim(2013). Characteristically, Tier 4 regulation apply the NRTC mode which is a transient cycle. And technical studies using NRTC mode are uncommon. In this study, for satisfy the Tier 4 final regulation on the NRTC mode, experimental study was conducted using a 3.4 L off-road engine. Fuel injection timing and injector hole number are chosen as parameters for investigation of combustion and exhaust gas characteristics on off-road diesel engine.

Key Words : Non Road Transient Cycle Mode (NRTC), Injector, Injector timing, Off-road diesel engine

1. 서론

대기 환경 개선에 대한 관심 증가로 환경오염의 주된 원인으로 화석 연료를 사용하는 내연기관이 대두 되고 있다. 이로 인해 내연기관의 배출가스 규제가 강화 되었고 배출가스 규제 만족을 위해 CRDI, EGR, DPF 등의 기술연구 및 개발이 진행되고 있다. 이러한 기술은 대부분 온로드 차량에 적용 되고 있다. 배출가스 발생의 비중이 이동수단에 집중 되어 있지만, 온로드 차량뿐만 아니라 비도로 차량에서 배출되는 배출가스 또한 증가하고 있는 추세이다. 이렇게 비도로 차량으로는 건설기계, 농기계, 기관차 등이 있으며, 주로 디젤 엔진을 사용하여 엔진 특성상 NOx가 많이 배출된다[1]. 배출가스 발생의 비중이 커지면서 배출가스규제 또한 강화되었다. 현재 미국에서는 2013년부터 Tier 4 interim을 시작으로 비도

로 차량의 규제를 강화하고 있으며, 국내에서도 2014년부터 트랙터, 콤파인 등과 같은 농기계용 디젤 엔진을 시작으로 점차적인 배출가스 규제 강화를 목표로 하고 있다. 배출가스 규제를 만족하기 위해 여러 배출가스 저감기술들이 대두되고 있으며, 디젤기관의 배출가스 중 NOx의 저감이 가장 어려운 문제점을 가지고 있다. NOx는 연소 온도와 연료 분사 상태에 따라 큰 영향을 받으며, 기계식 디젤엔진을 사용하는 비도로 차량은 분사시기와 연료량을 제어하는 연료시스템을 통해 NOx 저감이 가능하다[2-5].

또한 비도로 디젤엔진의 Tier 4 배기규제에서는 NRTC 모드를 적용하며, 이 모드는 transient 모드로 급가감속과 같이 비도로 차량의 실제 주행과 유사하게 전체적인 엔진영역을 사용하는 특징을 가진 모드이다[6,7].

따라서 본 연구에서는 분사 시기 등의 연료 분사 조건에 따라 NRTC모드를 적용한 비도로 디젤엔진에 미치는 연소 및 배기가스 배출 특성을 고찰하고자 한다.

† Corresponding Author, kimhm@katech.re.kr

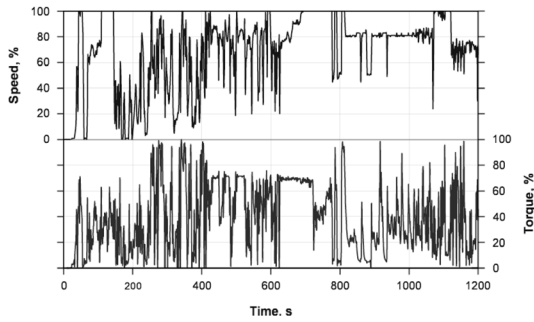


Fig. 1. NRTC mode.

2. 시험장치 및 방법

2.1. NRTC 시험모드

NRTC 모드는 유럽과 미국(EPA)에서 개발한 비도로 디젤엔진 배기가스 인증 평가 시험방식으로 Fig. 1 과 같이 1238 sec의 사이클로 이루어지며, 실제 운전 상태와 같이 엔진회전수 및 부하를 변동하는 시험 사이클로 이루어져 있다. 배기가스는 모드 전체구간에서 측정하여 엔진의 배출량을 산출한다.

2.2. 시험장치 구성

본 연구에서는 비도로 디젤엔진을 사용하여 연료 분사시기 및 인젝터 변경에 따른 배출가스 특성을 알아보기 위해 Fig. 2와 같이 실험 장치를 구성하였다. 디젤엔진의 배기량은 3.4 L, 최대 출력 82PS 이며, 과급기(WGT)를 장착하였고 세부 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 3은 실험 장치 구성 개략도이다.

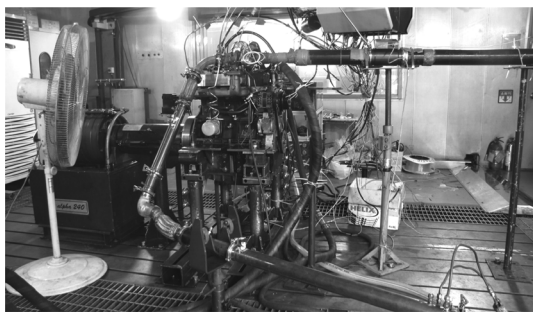


Fig. 2. Photograph of engine installation and experimental equipment.

Table 1. Specifications of test engine

Type	4 stroke / 6 cylinder
Displacement	3.409 L
Max Power(PS)	82 PS / 2500 rpm
Intake type	Turbo-charged
Type of fuel injection	DI-Injection

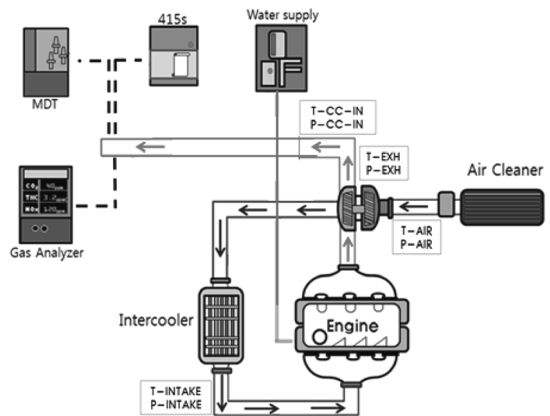


Fig. 3. Schematic diagram of experimental system.

장치로는 AVL사의 ALPHA 240 kW의 엔진동력계를 사용하였으며, 배기가스 측정을 위해 Horiba 사 MEXA - 9100D EGR과 PM 포집 장치인 NOVA사의 MICRTROL5를 사용하였다. 실험 조건 중 온도조건에 관해 실내온도를 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 엔진 냉각수온도를 80°C , 디젤 연료온도를 $38 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하여 실험을 진행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 분사시기 변경에 따른 배출가스 특성

분사시기 변경에 따른 배출가스 특성 분석을 위해 분사시기를 ATDC 2° 에서 ATDC 4° , BTDC 3° , TDC로 변경하여 실험을 수행하였다. 분사시기를 제외한 다른 실험 조건은 동일하게 하여 수행하였다. Fig. 4는 분사변경에 따른 THC 배출을 NRTC 모드 진행에 따라 나타낸 그래프로 분사시기 ATDC 4° 에서 THC 증가를 확인할 수 있다. 이는 연료분사시기가 ATDC 2° 에서 ATDC 4° 로 변경되면서 연소실 내부가 최고 연소온도 일 때 연소가 이루어지지 않아 분사된 연료의 완전 연소가 어려워 THC의 발생이 증가하는 것으로 보인다. THC 발생은 ATDC 4° 에서 최대 96 ppmC로 측정되었으며, 최대 발생 부분에서 ATDC 4° 를 제외한 발생량 40 ppmC의 2배 증가가 해당하는

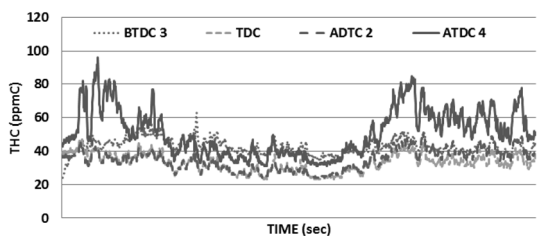


Fig. 4. Real THC data for NRTC mode at fuel Injection Timing.

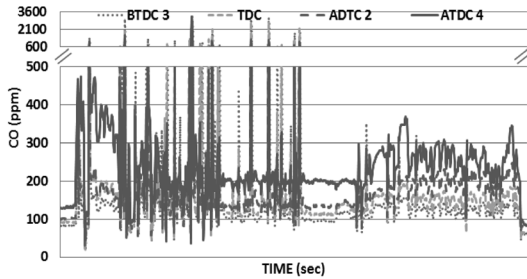


Fig. 5. Real CO data for NRTC mode at fuel Injection Timing.

수치 발생하였다. Fig. 5는 NRTC 모드 전체에서의 CO를 나타낸 것이다. 급가속 구간 적용으로 인해 CO의 발생이 따라서 증가하는데 최대 3558 ppm까지 발생하고 급가속이 적은 영역에서는 CO의 발생이 안정적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 디젤 엔진에서 연소시 급가속으로 행정시 연소 과정이 빠르게 이루어지기 때문에 높은 CO가 발생한 것으로 판단된다. 또한 급가속 구간에서 많은 양의 CO가 발생하는 원인은 엔진 연소실 내 산소 농도의 일시적인 저하 때문으로 판단된다. 분사시기를 ATDC 4°로 변경하면서 최고 연소온도보다 낮은 온도에서 연료 분사 및 연소가 이루어지기 때문에 산소 결핍이 발생하여 다른 분사시기에 비해 CO의 발생이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 분사시기가 늦어질수록 CO의 발생량이 증가하는데 이는 연료와 산소의 혼합 시간이 점점 짧아졌기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 분사시기 조절에 따른 NOx 발생을 실시간으로 나타낸 것이다. NOx의 생성을 지배하는 것은 산소의 국부농도 및 연소의 지속시간이며, NOx는 확산연소단계 동안 반응영역의 희박한 쪽에서 많이 발생한다. 분사시기를 초기상태의 ATDC 2°에서 BTDC 3°로 진각시켰을 때, 연료 분사시기가 앞당겨짐으로써 착화지연이 길어져 실린더내의 압력이 상승하므로 연소실 온도가 증가되어 NOx 생성량이 많아지는 것으로 판단된다[8].

분사시기 조절에 따른 엔진 배기 배출 특성을 Fig. 7~10에 나타내었다. ATDC 2°대비 ATDC 4°로 분사시

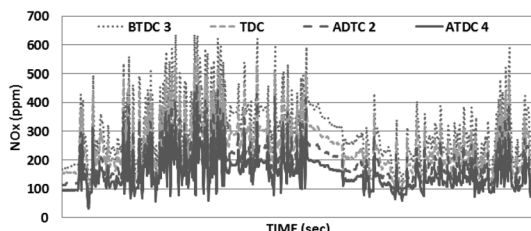


Fig. 6. Real NOx data for NRTC mode at fuel Injection Timing.

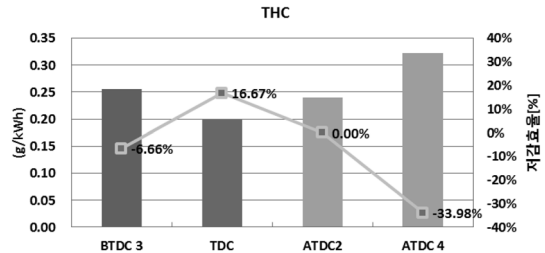


Fig. 7. Result of total THC for NRTC mode at fuel Injection Timing.

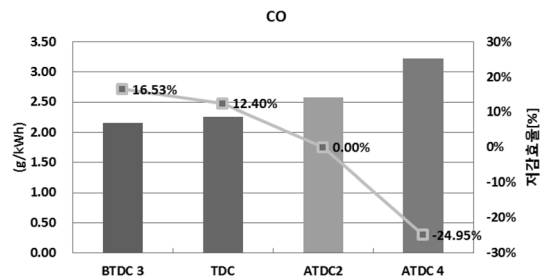


Fig. 8. Result of total CO for NRTC mode at fuel Injection Timing.

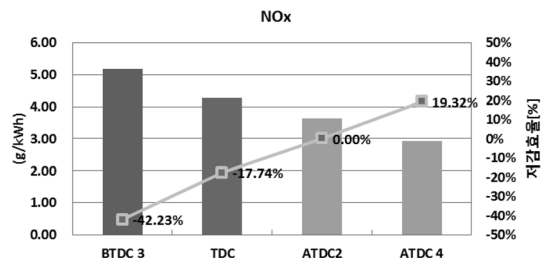


Fig. 9. Result of total NOx for NRTC mode at fuel Injection Timing.

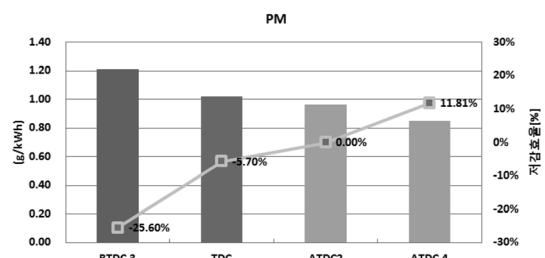


Fig. 10. Result of total PM for NRTC mode at fuel Injection Timing.

기를 진각시킬 때 배출량은 NOx 19.32%, PM 11.86% 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 THC와 CO의 발생량은 33.98%, 24.95% 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 분사시기를 BTDC 3°로 진각 시키면 연소실 내부의 최고 압력이 높아지고 압력 증가로 인해 열 발생량이 증가하여 NOx가 42.23% 증가

하는 것을 알 수 있다. 분사시기를 진각시킴으로 인해 연소 지연으로 연소온도가 낮아지며 이러한 문제점들은 연소효율 감소를 초래하게 되어 PM 발생량은 최고 25.60%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. NOx를 저감하기 위한 최적의 분사시기 조건은 NRTC 모드 측정 결과 ATDC 4°로 나타났다. 배출가스 중 THC와 CO의 발생량이 많은 단점이 있지만 향후 강화되는 Tier 4 배기 규제를 만족하기 위해서 후처리 시스템 적용은 불가피하며, 이로 인해 THC와 CO는 90% 이상 저감이 가능하기 때문에 본 실험에 분사시기 변경으로 인한 THC 및 CO 배출의 변화는 배기규제를 만족하기 위한 연구에서 무시할 수 있는 수준으로 판단된다.

3.2. Injector 변경에 따른 배출가스 특성

인젝터 hole 변경으로 연료분사에 따른 엔진 특성을 알아보기 위해서 4hole과 6hole의 두 인젝터를 사용하며, NRTC 모드를 통해 발생하는 배출가스 특성을 파악하였다. Fig. 11은 NRTC 모드 실시간데이터로 배기온도를 나타낸 그래프이다. 두 인젝터 적용 조건의 비교결과 6hole대비 4hole일 때 배기온도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 분사된 연료가 완전 연소되지 않고 배출되어 연소 후 배출된 배기온도에 의해 연소되어 상승하는 것으로 사료된다.

Fig. 12는 NRTC 모드 실시간데이터로 배기압력을 나타낸 것이다. 인젝터를 4hole에서 6hole로 변경하였을 때 배기압력이 4hole 대비 20 mbar 증가하였다. 6hole 인젝터의 연료분사시 연료 미립화가 4hole

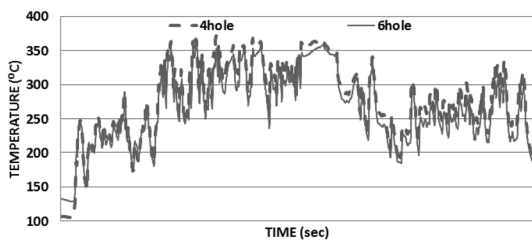


Fig. 11. Real Exhaust Temperature data for NRTCmode at fuel amount.

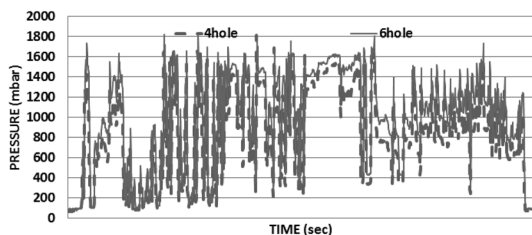


Fig. 12. Real Exhaust Pressure data for NRTCmode at fuel amount.

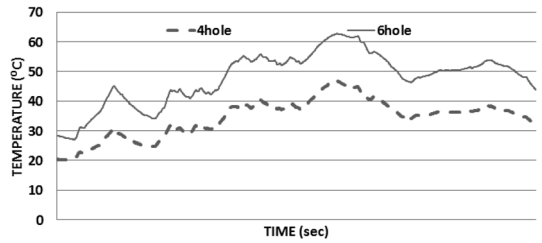


Fig. 13. Real Inter-cooler out Temperature data for NRTC-mode at fuel amount.

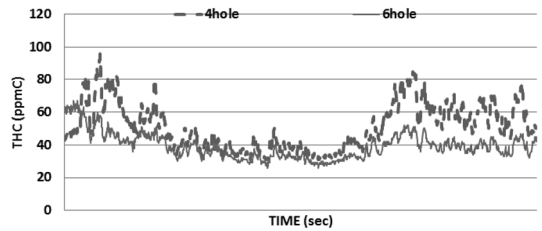


Fig. 14. Real THC data for NRTCmode at fuel amount.

인젝터보다 잘 이루어지기 때문에 연소효율과 연소압력을 증대시켜 배기압력이 증가하는 것으로 판단된다. 이로 인해 연소시 폭발 압력을 동력원으로 사용하는 과급기 또한 연소효율 증가로 4hole 인젝터 대비 과급압력이 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 13은 인터쿨러 후단 온도를 나타낸 것이다. 두 인젝터 비교시 6hole의 인젝터 적용시 인터쿨러 후단온도가 10°C 증가하는 것으로 나타났다. 이는 디젤엔진의 경우 확산연소가 이루어지기 때문에 연소시 공기의 혼합에 따라서 연소효율의 차이가 발생함을 의미한다. 인젝터를 6hole로 변경시 연료의 무화특성 및 관통성 개선으로 인해 연료와 공기의 혼합성이 증가하게 되어 연소 효율 증가로, 과급기의 동력원인 배기압력을 증가 시키는 요인으로 작용한다. 과급효율 증가로 4hole 대비 흡입되는 공기량이 증가하며, 이상기체 방정식에 의하여 동일조건에서 압력이 증가하는 경우 온도가 상승하게 되는데, 이로 인해 인터쿨러 후단의 온도가 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 14는 NRTC 모드에 따른 THC의 실시간 발생량을 나타낸 것이다. 6hole 인젝터 적용시 4hole 인젝터에 비해 급가속 고부하 영역에서 THC 발생이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 급가속 고부하시 연료 미립화가 4hole 대비 더 진행되어 급가속 및 고회전으로 불완전 연소 현상이 감소되어 급가속 및 고회전으로 불완전 연소 현상이 감소하여 최대 30 ppmC 낮게 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 15는 NRTC 모드에 따른 CO의 실시간 발생량을 나타낸 것이다. 6hole 인젝터 변경으로 4hole 인젝터 대비 CO 발생이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 연료 분사 시 인젝터 hole 증가로 연료 미립화가 증

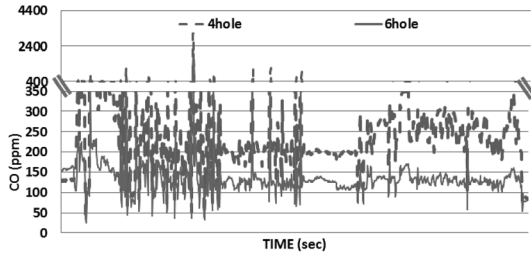


Fig. 15. Real CO data for NRTCmode at fuel amount.

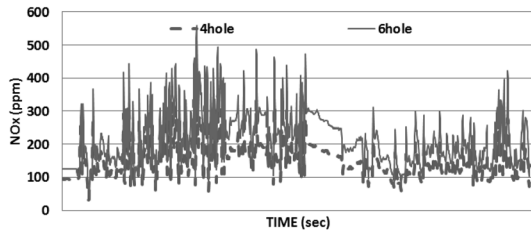


Fig. 16. Real NOx data for NRTCmode at fuel amount.

가하면서 연소 시 산소와의 혼합성 증가로 인해 CO가 감소하는 것으로 판단되고, 고부하 영역에서는 최대 100 ppm 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 16은 NOx를 나타낸 것으로 6hole 적용 시 NOx는 증가하였다. 이것은 연료노즐의 증가로 분무의 미립화가 개선되며, 연소 시 연료의 기화가 빨라져 연소시 공기와 혼합이 증가하여 미립화가 적은 4hole 대비 6hole 적용시 NOx 발생은 80 ppm 증가하였다. 연료의 미립화 증가로 인해 착화 지연 감소로 NOx가 증가하는 것으로 판단된다.

인젝터 hole 변경에 따라서 NOx를 저감하기 위해서는 적정 hole이 필요한 것으로 나타났다.

인젝터 hole 증가로 인해 NOx는 증가하였으며 THC와 CO는 감소하였다. 이는 인 연료의 미립화를 통해 압축행정시 연료 증발을 증가시켜 불안전 연소가 감소하기 때문이며, 연소효율이 증가되면서 연소시 최고온도가 증가하여 NOx 발생이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 17~20은 인젝터 변경에 따른 NRTC 모드 배출가스 총량을 나타낸 것이다. 4hole 인젝터 대비 6hole 인젝터를 적용함으로써 CO의 발생량은 42.38% 감소하며, THC 발생량 19.99% 감소, SMOKE의 발생량은 29.85% 감소하는 것으로 나타났으며, 반면에 NOx는 41.66% 증가함을 확인하였다. 이는 인젝터 홀수 증가에 따른 연료의 미립화로 인해 불완전연소 및 분사 불균열의 감소로 고온의 확산 연소가 가능하게 되어 THC, CO, PM과 같은 배출물의 감소로 이어지는 것이라 판단된다. 또한 인젝터 분사 홀수 증가로 출력 향상을 기대할 수 있으며, 이에 NOx의 배출증가 또한 예상할 수 있다.

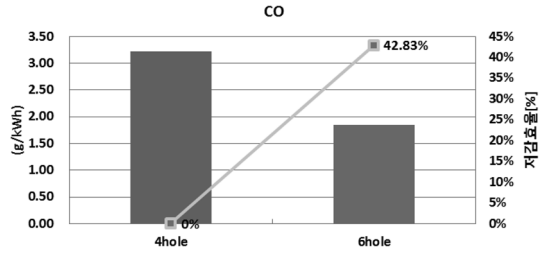


Fig. 17. Result of total CO for NRTC mode at fuel amount.

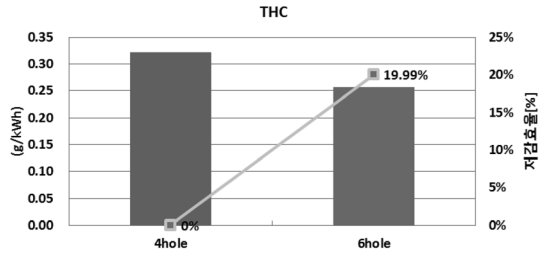


Fig. 18. Result of total THC for NRTC mode at fuel amount.

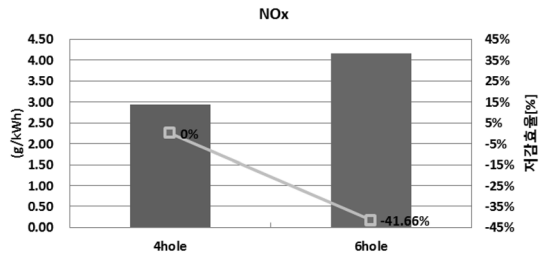


Fig. 19. Result of total NOx for NRTC mode at fuel amount.

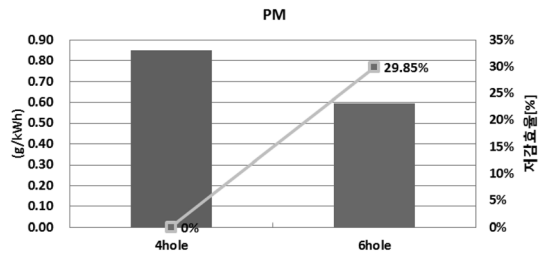


Fig. 20. Result of total PM for NRTC mode at fuel amount.

4. 결론

본 연구에서는 배출가스 저감을 위해 Tier 4 규제 시험모드인 NRTC모드에서 분사시기 및 인젝터 변경을 적용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 분사시기에 따라 질소산화물은 BTDC 3° 대비 ATDC 4°일 때 43.1% 감소하며 입자상 물질은 29.7% 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 분사시기를 ATDC 2°에서 BTDC 3°로 진각시켰을 때 연소 시 흡입된 공기가 압축초기에 미리 분

사된 연료와 혼합되기 때문에 후반부에서 연소량이 증가하여 배출가스 온도가 상승하였다.

3) 인젝터 hole 수의 증가로 인해 연료의 미립화가 증가되어 연소 효율이 증가하였으나, NOx 발생량 또한 증가하였다.

4) 6hole 인젝터의 연료분사 시 연료 미립화가 4hole 인젝터 대비 잘 이루어지기 때문에 연소효율과 연소 압력을 증대시켜 배기압력을 증가시켰다.

5) 분사시기 및 인젝터 변경으로 인해 배기특성이 의미있는 수준으로 변화하며 전처리 기술을 통한 NOx 저감에 있어 엔진 적용 시 여타 배출 악화의 개선을 위해 후처리기술의 동시적용이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Y.K. Jang, J.H. Hong, Annual Trends of Air Pollution Emission from Construction and Agricultural Equipments, J. KOSA E 19(6) (2003) 805-810.
- [2] G.B. Cho, H.S. Kim and J.H. Kang, A Study of the Reduction of Diesel-Engine Emissions for Off-Road Vehicle, KSME-B.2011.35.6.577 (2011).
- [3] E. Ngan, P. Wetzel and J. M. JR, Final Tier 4 Emission Solution Using an Aftertreatment System with a Fuel Reformer, LNT, DPF and Optional SCR, SAE Paper 10.4271/2011-01-2197 (2011).
- [4] J.H. Kang, J.S. Han, J.W. Chung, G.W. Jeong, G.B. Cho, J.H. Lim and S.K. Pyo, Exhaust Gas Recirculation System Applied to 56 kW Off-Road Vehicle to Satisfy the Tier 4 Interim Emission Regulation, KSAE 36(2) (2012) 127-224.
- [5] N. Jun, The 7th KOREA-JAPAN joint seminar on "Safety for Agricultural Machinery" (2012).
- [6] Dieselnets, "Nonroad Transient Cycle", www.dieselnets.com.
- [7] MECA, "Diesel emissions testing", www.meca.org.
- [8] J.K. Lim, S.Y. Choi, Effects of Fuel Injection Timing on Exhaust Emissions Characteristics in Diesel Engine, KORMARC (2001) 50-56.