

건설기계용 엔진의 국내 표준시험모드에 따른 배출가스 특성 및 개선

주태현* · 유승훈* · 이창언***

*인하대학교 자동차동력계부품 지역혁신센터 · **인하대학교 기계공학과

Improvement of Emissions from Diesel Engine according to the Korean Standard Test Cycle in the Construction Equipment

Taeheun Joo*, Seunghun Yu* and Chang-Eon Lee***

*Inha University Regional Innovation Center for Automobile Powertrains

**Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received 1 December 2014, Received in revised form 5 December 2014, Accepted 5 December 2014)

ABSTRACT

The emission standard of diesel engine on the construction equipment has been rapidly enhanced in advanced countries, because most of air pollutions was caused by construction equipment. So, all of the construction equipments will be tested for emission with standard measurement mode. But, the standard measurement mode of construction equipment is different for non-road and one for the road in Korea. This study was conducted to measure emission characteristics of the construction equipment with changed standard measurement mode and to improvement the emissions experimentally.

Key Words : Construction equipment, Emission test standard, ESC, ISO8178 C1

1. 서론

현재 미국을 비롯한 선진국에서는 자동차 디젤 엔진의 배기가스에 대한 규제와 더불어 디젤 기관을 장착한 건설기계에 대해서도 배기가스 규제를 점점 강화하고 있는 상황이다[1,2]. 건설기계에 대한 배기가스 규제는 1996년 미국의 EPA에서 처음 발표(Tier 1)된 이후로 유럽의 산업용 엔진 규제인 EU Stage I의 기준이 되었으며, 이후 동일한 수준으로 배기가스 규제를 점차 강화하여 왔다. 또한, 미국 EPA와 유럽 등의 선진국에서는 점차적으로 자동차용 엔진 규제와 산업용 엔진 규제의 격차를 줄여 나가고 있는 상황이다.

산업용 디젤 엔진과 자동차용 디젤 엔진의 1차적인 규제 대상은 입자상물질과 질소산화물로 Fig 1은 이들 규제 대상에 대한 자동차용 엔진과 건설기계

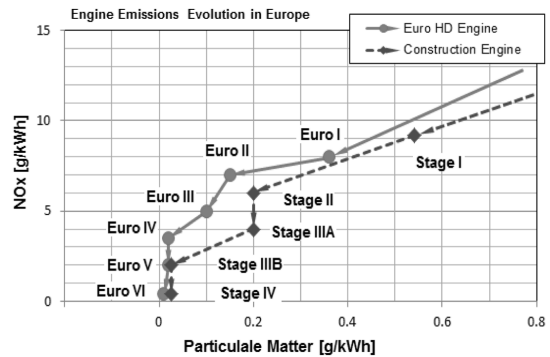


Fig. 1. Engine Emission evolution in Europe.

용 엔진의 배기규제 변화를 나타낸 것이다. 그래프를 살펴보면, 자동차용 엔진과 건설기계용 엔진의 규제치 사이에는 시간적인 차이를 보이고는 있지만, 대체적으로 자동차용 규제치를 건설기계용 엔진의 규제치가 뒤따르고 있음을 알 수 있다[3].

건설기계용 엔진은 작업 특성상 출력이 높은 디젤 엔진을 주로 사용하며, 배기량과 부하율, 연료 소비율이 타 목적의 엔진에 비해 높아, 배출 가스가 상대적으로 많이 발생된다. 그러나 현재까지 건설기

† Corresponding Author, chelee@inha.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계용 엔진의 배출허용 기준은 타 목적의 엔진에 비하여 완화된 기준을 적용하고 있어, 전체 비도로 이동오염원 중 입자상물질(PM), 및 매연, 질소산화물(NOx)과 같은 오염물질의 대부분이 건설기계에서 배출되고 있는 것으로 보고되고 있다.

국내 등록된 건설기계의 종류에 따른 비율('14년 9월 기준)을 살펴보면, 전체 건설장비의 종류는 27종으로 총 등록 대수 427,016대 중 굴삭기, 덤프트럭, 지게차가 전체 건설기계의 약 83%를 차지하고 있으며, 다음으로 콘크리트믹서트럭, 로우더, 기중기, 콘크리트펌프트럭 등의 순으로 높은 비율을 차지하고 있다[4]. 이 중 덤프트럭 및 콘크리트믹서트럭, 콘크리트펌프트럭은 도로용으로 구분되어 대기환경보전법상 화물자동차로 분류되어 일반 경유사용 자동차와 동일한 배출가스 규제가 적용되고 있으나 3종을 제외한 나머지 24종의 건설기계는 비도로용으로 분류되어 보다 완화된 배출가스 규제가 적용되고 있다[5].

Table 1과 2는 국내 건설기계용 엔진과 대형화물차용 엔진의 배출허용 기준을 나타낸 것이다. 현재 국내 건설기계 엔진의 배출허용 기준은 비도로용 건설기계 엔진의 경우 '08년부터 시행된 미국 환경보

호청(EPA)의 Tier 3과 유럽 EC지침(Directive 97/68/EC)의 EU StageIIIA와 동일한 기준을 '09년부터 적용하고 있으며, 표준시험모드는 ISO-8178 C1 모드를 사용하고 있다. 도로용 건설기계 엔진의 경우 대기환경보전법 상 화물자동차로 분류되어 일반 경유사용 자동차와 동일한 기준인 EuroVI 기준이 '13년부터 적용되고 있으며 표준시험모드는 대형화물차 엔진의 시험과 동일한 WHSC(World Harmonized Stationary Cycle)와 WHTC(World Harmonized Transient Cycle) 모드를 사용하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 실제 건설기계에 사용되고 있는 엔진을 활용하여 대기환경보전법상 도로용과 비도로용으로 구분된 표준시험모드에 따른 배출가스 특성을 비교 검토하고, 배출허용 기준을 만족하지 못하는 경우 이를 개선하고자 한다.

2. 실험 엔진 및 방법

2.1. 실험 대상 엔진

본 연구에서 건설기계 엔진의 도로용 및 비도로용 표준시험모드의 차이에 따른 배출가스 특성을 검토하기 위해 사용된 엔진은 7L 급 디젤 엔진으로 Bosch 사의 EDC 17 ECU를 사용한 고압 연료 분사 커먼레일(Common-rail) 시스템이 장착되어 있다. 이 엔진은 배출가스 저감을 위해 SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매가 장착되어 있으며 동일한 ECU에서 엔진의 제어 및 배출가스 저감 장치의 제어 모두가 수행되고 있다. Table 3~4는 시험에 사용된 엔진의 제원 및 제작사의 배출가스 시험 결과이다. 최근 엔진 제어 기술의 발달과 배기가스 규제 강화로

Table 1. Emission standard of construction equipment in Korea

| Year | CO | NMHC | NOx | PM | Mode |
|------|-----|------|-----|-------|--------------|
| 2004 | 5.0 | 9.2 | 1.3 | 0.54 | KC1-8 |
| 2005 | 3.5 | 6.4 | | 0.2 | KC1-8 |
| 2009 | 3.5 | 4.0 | | 0.2 | ISO8178 C1-8 |
| 2015 | 3.5 | 0.19 | 0.4 | 0.025 | NRSC & NRTC |

*225 kW 기준에 한함, 단위 g/kWH

Table 2. Emission standard of heavy-duty truck in Korea

| Year | CO | HC | NOx | PM | Mode |
|-------|-----|------|------|------|------------|
| ~1999 | 4.9 | 1.2 | 6.0 | 0.25 | D-13 |
| 2000 | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 0.20 | D-13 |
| 2001 | 3.0 | 1.0 | 6.0 | 0.15 | D-13 |
| 2002 | 2.1 | 0.66 | 5.0 | 0.10 | ND-13 |
| 2006 | 1.5 | 0.46 | 3.5 | 0.02 | ND-13 |
| | 4.0 | 0.55 | 3.5 | 0.03 | ETC |
| 2009 | 1.5 | 0.46 | 2.0 | 0.02 | ND-13(ESC) |
| | 4.0 | 0.55 | 2.0 | 0.03 | ETC |
| 2014 | 1.5 | 0.13 | 0.40 | 0.01 | WHSC |
| | 4.0 | 0.16 | 0.46 | 0.01 | WHTC |

*중량 및 초대형 화물차 기준, 단위 g/kWH

Table 3. Specification of test engine

| | |
|-----------------------|-------------------|
| Cylinder type | In-line 6 |
| Cam type | DOHC |
| Max. Power (kw) | 199 @ 2,300 |
| Max. Torque (kgf · m) | 112 @ 1,200~1,700 |
| Max. Speed (rpm) | 2,350 |
| Bore × stroke (mm) | 108 × 130 |
| Displacement (cc) | 7,142 |
| Compression ratio | 18 : 1 |
| Injection order | 1-5-3-6-2-4 |
| Injection device | Common-rail |
| Idle speed (rpm) | 700 ± 50 |
| Aspiration | TCI |
| After treatment | SCR |
| Emission regulation | Euro-V |

Table 4. Emission test result of test engine

| | | | |
|------------------------|----------------|-----------------|---------|
| Emission | ESC (g/kWh) | CO | : 0.06 |
| | | HC | : 0.000 |
| | | NO _x | : 1.35 |
| | | PM | : 0.018 |
| | ETC (g/kWh) | CO | : 0.08 |
| | | NMHC | : 0.000 |
| | | NO _x | : 1.67 |
| ELR (m ⁻¹) | | : 0.17 | |

인하여 전자제어엔진이 널리 보급되면서, 건설기계용 엔진에도 커먼레일 연료 분사 시스템과 SCR촉매 등이 많이 적용되고 있다. 이러한 전자제어 엔진은 ECU에 의해 연료의 분사 시기 및 분사량 등이 제어 되고, 배출가스 저감을 위한 Urea의 분사 및 분사량 등이 동일한 ECU 또는 별도의 전자장치에 의하여 수행된다.

또한 엔진에 부착된 각종 센서를 통하여 엔진의 운전 상태에 대한 모든 정보가 ECU에 수집되고 이를 토대로 엔진의 각 부품에 대한 제어가 이루어지기 때문에, 건설기계 엔진에 대한 배출가스 시험을 위해서는 ECU의 기능을 일부 제한하거나, 엔진 동력계 시험을 위한 별도의 엔진 제어 모듈이 필요하다. 본 연구에서는 건설기계에 장착된 엔진과 ECU를 그대로 장착하고 SCR 촉매 및 Urea 인젝터, NOx 센서 모듈 등의 각종 센서를 건설기계에서와 동일하여 장착하여 엔진 동력계에서 표준시험모드에 따른 배출가스 특성 시험을 수행하였다.

2.2. 실험 장치 및 방법

Fig. 2는 시험 대상 엔진을 엔진 동력계에 장착한 시험 사진이며, Fig. 3은 건설기계에서와 동일하게

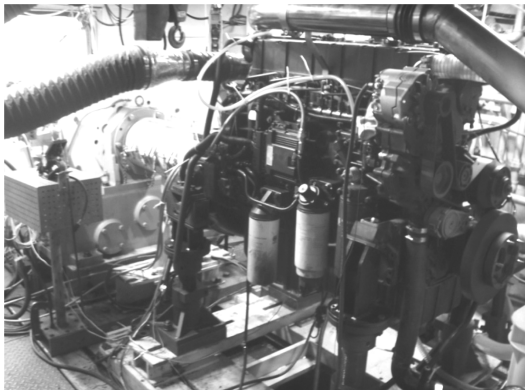


Fig. 2. Test engine and EC Dyno.

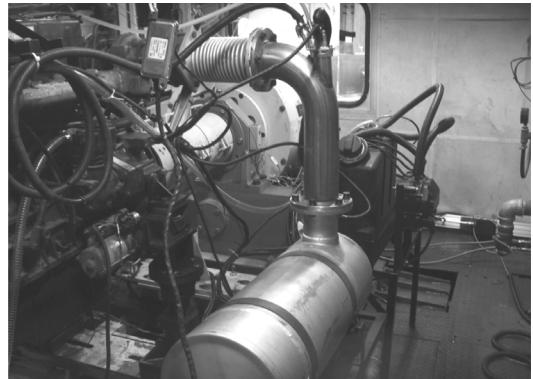


Fig. 3. SCR Catalyst for NOx reduction.

SCR 촉매 및 NOx 센서 모듈을 장착한배기계를 촬영한 사진이다. 시험에서는 EC 동력계(Max. Power : 300 kW)를 이용하였으며, 배기가스 분석을 위한 샘플링 포트(Sampling Port)는 SCR 촉매 후단에 장착하고 엔진 배출가스 분석기(MEXA-7100DEGR, Horiba)를 통한 CO 및 HC, NO_x, CO₂, CH₄, O₂ 농도를 각각의 모드 조건에서 마지막 3분 동안 실시간으로 측정하여 데이터수집장치를 이용해 저장하였다.

측정된 배기가스 농도는 각 모드의 평균값을 사용하였다. 마지막으로 입자상물질의 측정을 위해 마이크로 희석 터널(Micro-Dilution Tunnel)이 장착된 배출가스 입자상물질 측정장치 (MIT-3000, F-Techno.)를 사용하였으며, 포집용 필터에 모드 시험 중에 발생된 입자상물질을 부분희석방식으로 포집하여 무게를 측정하였다.

시험 엔진은 2013년에 제작된 EuroV 규제에 대응하는 건설기계 엔진으로 대상 엔진에 적용된 도로용 건설기계 엔진의 배기가스 규제(EuroV)에 따른 표준시험모드인 ND-13(ESC) 모드 시험과 비도로용 건설기계용 엔진의 표준시험모드인 ISO 8178 C1 모드 시험을 진행하였다.

Fig. 4는 배출가스 표준시험모드의 운전 조건을

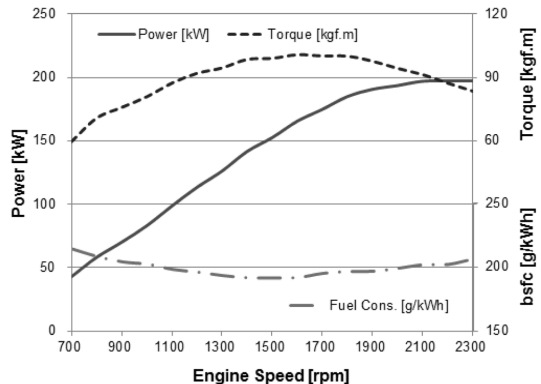


Fig. 4. Characteristic of engine performance.

설정하기 위해 엔진동력계에서 수행된 엔진의 전부 하 성능 시험 결과이다. 엔진 동력계에서 시험을 통해 확인한 시험 대상 엔진의 최대 출력은 엔진 회전수 2,300 rpm에서 197 kW로 측정되었으며, 엔진의 최대토크(Torque)는 엔진회전수 1,600 rpm에서 발생하였고, 97.05 kgf·m로 측정되었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 ISO8178 C1 모드의 측정 방법의 최대 출력 회전수와 Intermediate 회전수를 각각 시험 대상 엔진의 최대 출력과 최대 토크가 발생하는 2,300 rpm과 1,600 rpm으로 설정하였다. 또한 부하 조건은 해당 회전수에서 측정된 출력과 토크를 기준으로 부하 조건을 반영하여 엔진 동력계의 토크를 설정하였다. 다음으로 ESC 모드의 측정 방법에 따른 각 시험 구간의 A, B, C 회전수는 엔진 최대 출력의 70% 출력(Net Power)이 발생하는 최대 회전수(Nhigh)인 2,372 rpm과 최대 출력의 50% 출력이 발생하는 최저 회전수(Nlow) 1,100 rpm을 설정하고, 각 구간에서의 부하는 해당 엔진 회전수에서의 최대 토크를 확인하고 부하율을 곱하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{회전수 A} &= N_{\text{low}} + 0.25 \times (N_{\text{high}} - N_{\text{low}}) \\ \text{회전수 B} &= N_{\text{low}} + 0.50 \times (N_{\text{high}} - N_{\text{low}}) \\ \text{회전수 C} &= N_{\text{low}} + 0.75 \times (N_{\text{high}} - N_{\text{low}}) \end{aligned}$$

마지막으로 엔진 동력계에서 시험 대상 엔진의 엔진 회전수에 따른 최대 출력과 최대 토크를 확인하고 ISO 8178 C1 모드 및 ESC 모드 측정 방법에 따라 시험 모드 별 각 구간의 엔진 회전수 및 부하조건을 Table 5에서와 같이 설정하였다.

Table 5. Test Condition for Standard Mode

| ESC Mode | | | ISO 8178 C1 | | |
|----------|----------|------------|-------------|----------|------------|
| RPM | Load (%) | Weight (%) | RPM | Load (%) | Weight (%) |
| 700 | Idle | 15 | 2300 | 100 | 15 |
| 1418 | 100 | 8 | 2300 | 75 | 15 |
| 1736 | 50 | 10 | 2300 | 50 | 15 |
| 1736 | 75 | 10 | - | - | - |
| 1418 | 50 | 5 | 2300 | 10 | 10 |
| 1418 | 75 | 5 | 1600 | 100 | 10 |
| 1418 | 25 | 5 | 1600 | 75 | 10 |
| 1736 | 100 | 9 | 1600 | 50 | 10 |
| 1736 | 25 | 10 | - | - | - |
| 2054 | 100 | 8 | - | - | - |
| 2054 | 25 | 5 | 700 | 0 | 15 |
| 2054 | 75 | 5 | - | - | - |
| 2054 | 50 | 5 | - | - | - |

3. 실험 결과 및 분석

3.1. 표준시험모드에 따른 시험 결과

Fig. 5~6은 ESC 모드 시험의 측정 방법에 따른 배출가스 농도와 ISO 8178 C1 모드 시험에 의해 측정된 배출가스 농도를 질량으로 계산한 결과이다. 우선 ESC 모드 시험에 따른 배출가스 농도 측정 결과를 배기가스 질량 계산식으로 계산해보면, 일산화탄소와 탄화수소의 배출량은 각각 허용 기준치의 6%와 15% 수준이었으며, 질소산화물은 기준치의 70%, 입자상물질은 97% 수준으로 EuroV-EEV(Enhanced environmental friendly vehicle) 규제치를 만족함을 확인하였다.

여기서 EuroV-EEV 기준은 EuroV의 강화된 배기가스 기준으로 2013년까지 국내 초대형화물차용 디젤 엔진에 적용된 배기가스 규제의 허용 기준치와 동일한 기준이다. 다음으로 ISO 8178 C1 모드 시험 결과에 따른 각 구간에서 측정된 배출농도를 질량으로 계산한 결과를 살펴보면, 일산화탄소는 0.354 g/kWh 배출되었고 입자상 물질은 0.029 g/kWh 배출

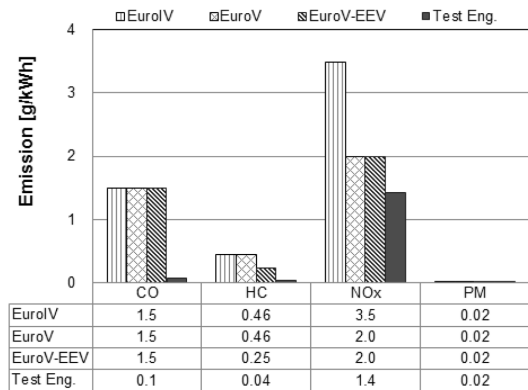


Fig. 5. Emission test result of ESC Mode.

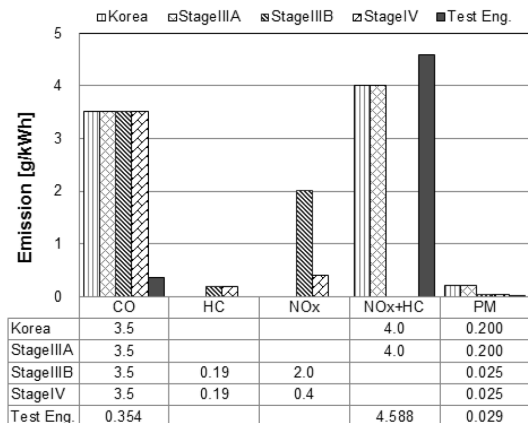


Fig. 6. Emission Test Result of ISO8178 C1.

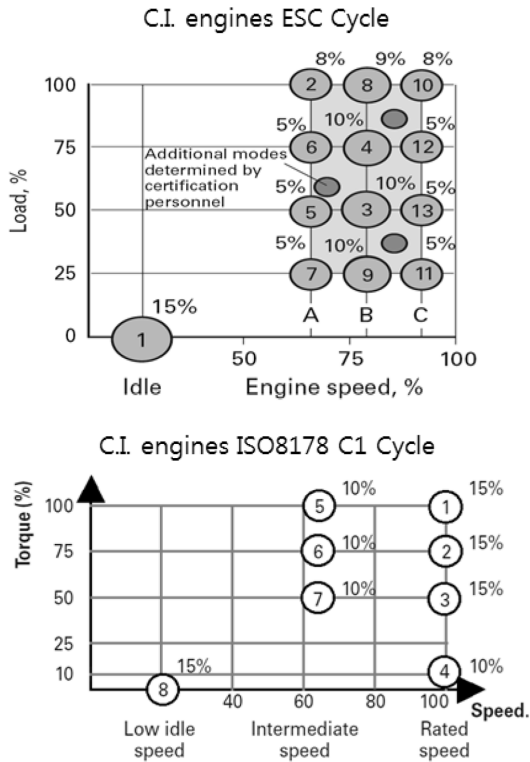


Fig. 7. Comparison of emission test cycle[6].

되어 국내 건설기계용 엔진의 배출 허용 기준치와 비교 시 10~15% 수준으로 허용 기준을 통과함을 확인하였다. 반면에 탄화수소 및 질소산화물의 허용 기준치는 4.0 g/kWh이지만, 시험 대상 엔진에서 측정된 배출량은 4.59 g/kWh으로 기준치를 15% 초과하는 것으로 확인되었다. 따라서 시험 대상 엔진은 국내 건설기계용 엔진의 배출 허용 기준치를 만족하지 못하여 운행이 불가능한 상황이다. 시험 대상 엔진이 EuroV 규제를 만족하는 엔진임에도 불구하고 ISO8178 C1 모드 시험에 따른 EuroIII 수준의 배출가스 허용 기준을 초과한 이유는 시험 모드의 차이에서 발생하는 결과이며, 엔진의 최대 출력이 발생하는 엔진 회전수 영역인 1~4 구간에서 질소산화물이 매우 높게 배출되어 배출가스 허용 기준을 초과한 것으로 판단된다. Fig. 7은 경유 사용 압축착화 방식의 건설기계 엔진 중 도로용 엔진의 배출가스 표준시험모드인 ESC 모드 시험과 비도로용 엔진의 표준시험모드인 ISO 8178 C1 모드 시험의 운전 조건을 엔진 회전수 및 부하에 따라 그래프로 표시한 것이다.

ESC 모드에서는 공회전 조건을 포함하고 엔진의 최대 회전수를 제외한 최대 회전수의 75% 근처에서 엔진회전수를 3조건으로 구분하고 엔진 부하(토크

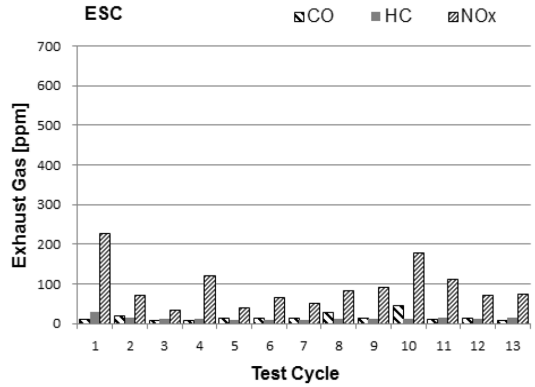


Fig. 8. Comparison of emission characteristic by ESC test cycle.

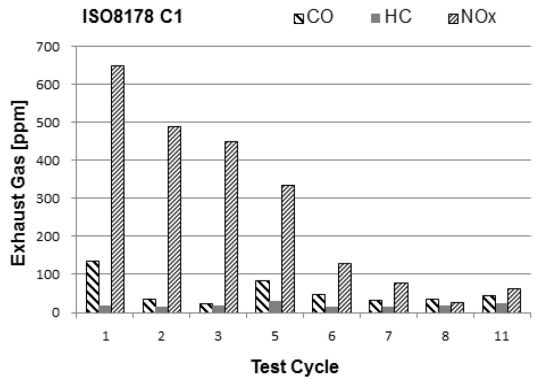


Fig. 9. Comparison of emission characteristic by ISO-8178 C1 test cycle.

기준) 25%~100%까지 25%씩 변경시켜 총 13가지 운전 조건으로 구성된다.

ISO 8178 C1 모드의 경우 ESC 모드와 구분되어 엔진의 최대 회전수 조건(최대 출력 발생 회전수)과 최대 회전수의 60%~80% 사이에서 엔진 최대 토크가 발생하는 회전수로 회전수를 2가지로 분류하고 엔진의 부하 50%~100%까지 25%씩 변경시켜 총 8가지 운전 조건으로 구성된다.

Fig. 8은 ESC 모드 시험 중에 측정한 각 모드 별 배출가스 농도이며, Fig. 9는 ISO8178 C1 모드 시험 중에 측정한 각 모드 별 배출가스 농도이다. 그래프를 살펴보면, ISO8178 C1 모드의 1~4 구간에서 질소산화물 배출 농도가 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 해당 구간이 엔진의 최대 출력 회전수인 2,300 rpm으로 운전되는 영역으로, EuroV의 표준시험모드인 ETC와 ESC 모드 시험에서 사용되지 않는 엔진 회전수 영역이기 때문에 SCR 촉매에 분사되는 요소(Urea)의 분사량 부족으로 인해 질소산화물 저감효율이 감소하여 나타나는 결과로 사료된다.

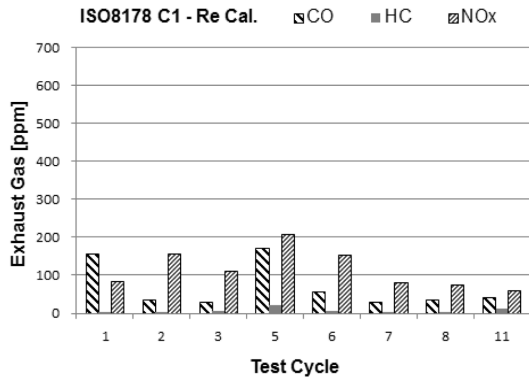


Fig. 10. Comparison of emission characteristic after ECU Re-Mapping by ISO8178 C1 test cycle.

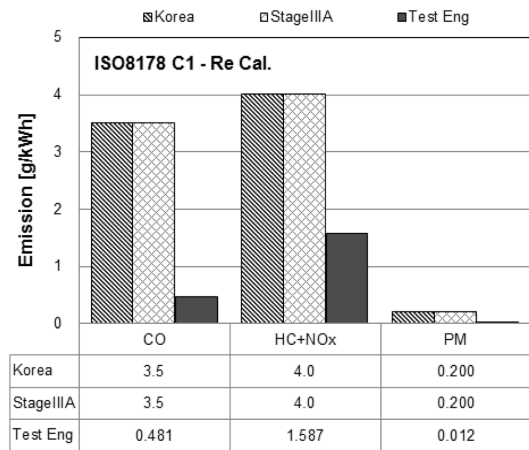


Fig. 11. Emission Test Result by ESC test cycle.

3.2. ECU Data 조정 후 배출가스 특성

시험에 사용된 엔진이 국내 비도로용 건설기계의 배출가스 허용 규제를 만족하기 위해서는 표준시험 모드인 ISO8178 C1 모드 시험에 맞춰 ECU 데이터를 수정할 필요가 있으며, 엔진 동력계에서 ECU 맵핑 (Mapping) 작업을 진행하였다.

ECU 맵핑은 엔진 제작사의 지원을 받아 이전 시험에서 NOx 농도가 과도하게 배출된 엔진 회전수 2,000 rpm 이상의 운전 영역에서 SCR 촉매에 공급되는 요소의 분사량과 커먼레일 인젝터의 연료 분사 시기 및 분사량을 추가로 조정하였다. Fig. 10은 ECU 맵핑을 통한 ISO 8178 C1 모드의 각 구간에 대한 배출가스 농도를 측정된 결과이다. 결과적으로 ECU 맵핑을 수행한 결과, 이전 ISO 8178 C1 모드 시험의 1~4구간에서 높게 배출되던 질소산화물의 배출 농도가 200 ppm 미만으로 저감된 것을 확인하였다. 또한, Fig. 11과 같이 이를 최종 배출가스 질량으로 계산한 결과, 국내 건설기계용 엔진 배출가스

허용 기준치의 50% 이하 수준으로 만족함을 확인하였다.

4. 결론

EuroV 규제를 만족하는 디젤 엔진을 사용하여 국내 비도로용 건설기계 엔진의 표준시험 모드인 ISO-8178 C1 모드와 도로용 건설기계 엔진의 표준시험 모드인 ESC 모드로 배출가스 측정 시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 국내 건설기계로 등록된 장비의 엔진은 대기 환경보전법에 명시된 규정에 따라 도로용과 비도로용으로 구분되며 서로 다른 배출가스 허용 기준이 적용되며 이에 따른 표준시험모드도 변경된다. 따라서, 전자제어엔진의 경우 표준시험모드의 차이에 따라 엔진 제어 장치(ECU)에 입력된 데이터 값이 최적화되지 못하여 배출가스 허용 기준을 초과할 수 있다.

2) 국내 도로용 건설기계의 배출허용 기준(13년 기준)과 동일한 EuroV 규제를 만족하는 엔진을 사용하여 해당 규제의 표준시험 모드인 ND-13(ESC) 모드 시험 결과 배출허용 기준을 통과하였으나, 비도로용 건설기계 엔진의 표준시험 모드인 ISO 8178 C1 모드 시험 결과 질소산화물이 허용 기준을 초과하여 기준치의 115%까지 높게 배출되었다. 모드를 구성하는 운전 영역에 대한 배출가스 농도를 확인 결과 ESC 모드 및 ETC 모드 시험에서의 운전 조건보다 높은 엔진 회전수 영역에서 NOx가 과도하게 배출되는 것을 추가적으로 확인하고 해당 영역에 대한 ECU 맵핑을 실시하였다.

3) ISO 8178 C1 모드의 운전 조건에 따라 엔진의 최대 출력이 발생하는 회전수 영역에 대하여 ECU 맵핑을 수행한 결과, 기존 대비 동일 시험 모드 구간에서 30~80% 수준의 NOx 저감이 가능하였으며 전체 배출량으로 계산 시 배출허용 기준치의 40% 수준으로 저감이 가능하였다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 지정 ‘인하대학교 자동차동력계부품 지역혁신센터’의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

[1] W.R.Chung, M.D.Eom, J.H.Yoo, C.S.Lim, A Study on the Estimation of Exhaust Emission by Non-road Construction Equipments, KOSAE Vol.15

- No.3, (1999).
- [2] NIER, A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicle(V), NIER No.2007-39-895, (2007).
 - [3] D.S.Kim, Trend of Emissions Regulation in Large Industrial Diesel Engine, Auto Journal, (2008) 101-105.
 - [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Statistics of Construction Equipment in Korea, (2014).
 - [5] E.J.In, D.W.Kim, K.W.Choi, J.S.Park, C.W.Park, J.H.Ryu, A study of test method and Emission standard for construction equipment, (2011) 26-32.
 - [6] Delphi, Worldwide emissions standards - HD and Off-Highway vehicles, (2014).