

# 굴착기의 부하율에 따른 실작업 질소산화물 배출 특성 연구

## Study on Real-Work NO<sub>x</sub> Emission Characteristics according to Load Factor of Excavator

신달호<sup>1</sup> · 박윤서<sup>2</sup> · 유철<sup>2</sup> · 박수한<sup>3\*</sup>

Dal Ho Shin, Yun Seo Park, Chul Yoo and Suhan Park

Received: 10 Aug. 2023, Revised: 16 Aug. 2023, Accepted: 18 Aug. 2023

**Key Words** : Construction machinery(건설기계), Excavator(굴착기), OBD(on-board diagnostics, 온-보드 진단기), Emission(배출가스), Load factor(LF, 부하율), Emission factor(EF, 배출계수)

**Abstract:** The purpose of this study was to investigate and compare the impact of engine load on the emission characteristics of excavator engines, with the aim of improving the method for calculating the emission inventory of construction machinery. The engine load in excavators is directly correlated with the operational workload, and variations in the load factor (LF) can significantly influence the emission inventory. Thus, on-board diagnostic (OBD) data from an excavator at a construction site were systematically collected to measure engine output and emissions. The results revealed discernible differences in emissions based on engine load, even when the average excavator engine performance remained constant. This highlights the significant influence of the type and characteristics of the work being carried out on emission characteristics. Making realistic adjustments to the LF used in emission calculation formulas emerges as a crucial strategy for environmental improvement. Moreover, the analysis of the effects of engine load on emissions from excavators provides valuable insights for enhancing environmental protection measures.

### 기호 설명

$P_c$  : Engine power, kW

$P_w$  : Rated engine power, kW

$T$  : Engine torque, Nm

$N$  : Engine rotational speed, rpm

$LF$  : Load factor

$EF$  : Emissions Factor, g/kWh

### 1. 서론

전 세계적으로 대도시의 인구밀도 증가와 급격한 도시화로 인한 환경문제가 증가하여 도심의 대기오염물질 배출량에 대한 관심이 높아지고 있다.<sup>1-2)</sup> 국내 대기오염물질 배출원은 도로이동오염원, 비도로이동오염원 등 총 13개의 대분류로 구분하며, 건설기계와 농업기계를 포함하는 비도로이동오염원은 전체 대기오염물질의 15%를 차지하여 많은 양의 대기오염물질을 배출하고 있다.<sup>3)</sup> 이러한 오염원의 배출량을 산정하기 위해 도로이동오염원에 속하는 승용차, 버스, 대형 트럭 등은 실제 도로에서 측정하는 배출량 관련 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>4-5)</sup> 특히 등록 비율이 낮은 초대형 트럭의 실제 도로 배출량을 측정하기 위한 실도로 경로를 개발하는 기초연구도 수행되었다.<sup>6)</sup> 비도로이동오염원에 포함된 건설기계 일부 굴착기의 경우 Fig. 1과 같이 도심의 거주지 인근 공사현

\* Corresponding author: suhanpark@konkuk.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

2 National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju 31214, Korea

3 School of Mechanical and Aerospace Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Usage of excavators at actual construction sites in Seoul

장에서 주로 사용되며, 배기가스 및 소음을 배출하고 있다. 이러한 건설기계의 대기오염물질 배출량을 정확하게 산정하기 위해 외국의 경우 건설기계의 배출가스를 실제 현장에서 측정하는 연구가 수행되고 있다.<sup>7-11)</sup> Abolhasani 등<sup>7)</sup>, Chen 등<sup>9)</sup>, Desouza 등<sup>10)</sup>에 따르면 건설기계에 PEMS를 설치해서 데이터를 측정했고, 실제 건설현장에서 측정한 배출계수와 배출가스 인벤토리에서 사용하는 배출계수에 차이가 있었다. Li 등<sup>8)</sup>은 실제 건설현장에서 측정한 배출계수를 통해 도시에서 발생하는 배출량을 산정하는 결과를 도출하였다.

대기오염물질의 높은 비율을 차지하는 비도로이동 오염원 중 건설기계와 농업기계의 배출량 산정식은 다음과 같다.<sup>12)</sup>

$$E_{ij} = N_j \times H_j \times HP_j \times DF \times LF \times EF_{ij} \times \frac{1}{10^3} \quad (1)$$

$E$ 는 건설장비  $J$ 종의 작동으로 인한 오염물질  $i$ 종의 배출량(kg/yr),  $N_j$ 은 건설장비  $J$ 종의 등록대수(대),  $H_j$ 는 건설장비  $J$ 종의 가동시간(hrs/yr),  $HP_j$ 는 건설장비  $J$ 종의 정격 출력(kW),  $DF$ 는 열화계수,  $LF$ 는 부하율,  $EF_{ij}$ 는 건설장비  $J$ 종의 오염물질  $i$ 종의 배출계수(g/kWh)이다. 현재  $LF$ 는 모든 건설기계에 0.48을 일괄 적용 중이며, 배출계수  $EF$ 는 실험실 환경에서 측정된 계수를 사용하고 있다.<sup>13)</sup> 하지만 Cao 등<sup>14)</sup>의 연구에 따르면 건설기계의 종류와 출력구간에 따라  $LF$ 가 달라졌다. 정격 출력이 92~171hp인 건설기계의 평균 출력사용은 50hp 미만으로 부하율 0.26 ~ 0.523, 정격 출력이 148~296hp인 건설기계의 평균 출력 51.8 ~90.7hp로 부하율은 0.276~0.561, 정격

Table 1 Comparisons of modeled and measured engine load factors (CAPSS: 0.48)

Type	Test <sup>14)</sup>	CARB <sup>15)</sup>	EPA <sup>16)</sup>
Bull Dozer	0.43	0.43	0.59
Excavator	0.47	0.38	0.59
Grader	0.31	0.41	0.59
Wheel Loader	0.33	0.36	0.59
Scraper	0.54	0.48	0.59

CARB: California Air Resources Board

출력 193~316hp인 건설기계 평균 출력은 100~150hp이고 부하율은 0.353~0.584이었으며, 정격 출력 280~540hp인 건설기계는 평균 출력이 161~275hp이고 부하율은 0.545 ~0.728로 측정되었다. 측정한  $LF$ 와 현재 배출가스 인벤토리에서 사용하는  $LF$ 를 Table 1에 비교하였다.

이동식 배출가스 측정장비 (portable emission measurement system, PEMS)를 통해  $EF$ 를 측정해본 선행 연구의 결과는 실험 환경 및 엔진 부하율에 따라서 차이를 보였다.<sup>17-20)</sup> 이와 같은 연구결과 굴착기 배출량 산정의 정확도를 개선하기 위해서는 계산식에 사용되는  $LF$ 를 현실화하여 세분화해야 하며,  $EF$ 는 건설기계의  $LF$ 에 따라 배출 특성이 달라짐을 알 수 있었다.

해외의 선행 연구에서는 실제 건설 현장에서  $LF$ 와  $EF$ 를 측정하는 연구가 활발히 수행되고 있는 반면, 국내에서는 실제 건설현장의 특성을 반영하는 연구 및  $LF$ 와  $EF$ 의 관계를 통해 배출량을 산정하는 방법에 대한 연구가 부족한 실정이다.<sup>21)</sup>

따라서 본 연구에서는 배출량 산정식의 중요한 두 가지 요소인  $LF$ 와  $EF$ 를 실제 건설현장에서 측정하여 엔진 부하율에 따른 배출특성을 분석하고, 이를 활용하여 배출량을 모의 산정하고자 한다.

## 2. 실제 건설현장 엔진데이터 취득

### 2.1 실제 건설현장 및 굴착기 제원

이번 연구를 수행한 건설현장은 Fig. 2와 같이 도심에 위치한 지하철 공사현장이다. 시험은 12월에 진행되었지만 영하로 내려가지 않고 영상을 유지하는 온도에서 공사가 진행되었다. 실제 건설 현장의 작업 특성을 살펴보면 지하철 공사현장으로 지하로 파내려 가는 굴착, 토지의 평탄화, 지하로 시멘트 및 자재 운반, 구조물 운반 등의 작업을 수행했다.

시험에 활용된 굴착기는 대형 건설현장에서 주로 사용되는 30톤급 크롤러 굴착기로 엔진은 직렬 6기통의 8L이며, 최고 출력은 1800rpm에서 202kW, 최대 토크는 1500rpm에서 1274Nm이다. 시험 굴착기의 제작연도는 2017년이며, 배출가스 정화를 위한 후처리 장치로 DOC와 SCR을 사용하는 Tier4 등급의 차량이다. 자세한 제원은 Table 2에 나타내었고 엔진 회전수에 따른 엔진출력 및 토크 곡선은 Fig. 3과 같다.



Fig. 2 Excavator used for testing at actual construction site

Table 2 Specifications of test excavator

Excavator	
Operating weight(ton)	30
Displacement(L)	8.0 (In-line 6)
Rate Power(kW/rpm)	202/1800
Max torque(Nm/rpm)	1274/1500
Emission grade	Tire 4
	DOC, SCR
Year of production	2017
Load Factor	0.459

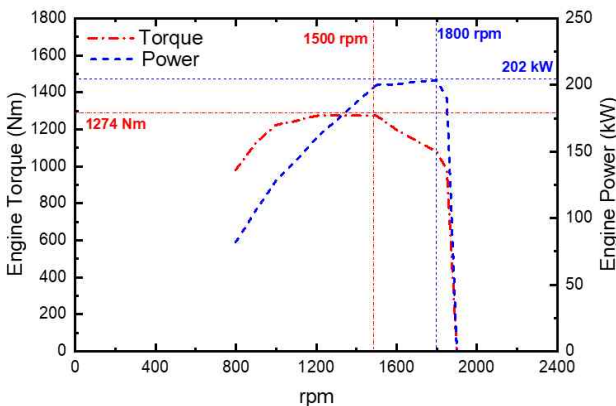


Fig. 3 Engine performance curve of excavator used in this study

## 2.2 데이터 취득 및 분석 방법

일반적으로 건설장비는 J1939 CAN 통신 프로토콜<sup>22)</sup>을 사용하기 때문에 OBD 단자를 통해 엔진 데이터 및 배출가스 데이터의 측정이 가능하다.

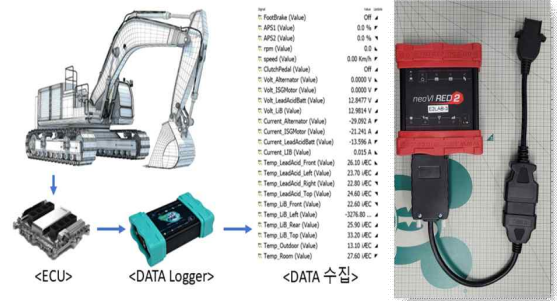


Fig. 4 Instrumentation system for engine data collection of the excavator

시험용 굴착기의 케빈에 있는 OBD 단자에 Fig. 4와 같이 CAN 통신 장비(NEO RED2, INTREPID社)의 장비단독 로깅 기능을 이용하여 2주간 굴착기에 장비를 설치해서 엔진 속도(rpm,  $N$ )와 엔진 토크(%) 및 배출되는 질소산화물( $\text{NO}_x$ , ppm)을 측정하였다. OBD로 측정된 엔진 토크(%)는 각 rpm에서 최대토크의 %를 나타내기 때문에 Fig. 3 엔진출력 곡선을 이용하여 엔진 토크(Nm,  $T$ )로 변환한 후 식 (2)를 이용하여 엔진 출력(kW,  $P_c$ )을 계산하였다. LF는 식 (3)과 같이 계산된  $P_c$ 를 제조사에서 제공한 엔진의 정격출력( $P_w$ )으로 나누어 계산하였다.

$$P_c = 2\pi N \times \frac{1}{60} \times T \times \frac{1}{10^3} \quad (2)$$

$$LF = \frac{P_c}{P_w} \quad (3)$$

엔진 CAN 데이터에서 측정되는 질소산화물의 경우 ppm으로 측정되기 때문에 식 (4)를 통해 배출계수 단위인 g/kWh로 변환하였다.

$$EF_{\text{NO}_x} = \frac{\text{ppm}}{10^6} \times \frac{MW_{exh}}{MW} \times \frac{1}{10^3} \times \frac{1}{m_{exh}} \times P_c \quad (4)$$

또한 출력사용 비율과 배출계수에 작업구간과 비작업구간의 비율이 중요한 요소가 되기 때문에 Stage5 ISM(In-Service Monitoring)<sup>23)</sup> 기준에 따라 2분 이상 작동하지 않는 상태가 지속되면 비작업 구간으로 간주하도록 코드를 구성하여 데이터를 분석하였고 Fig. 5와 같이 유효작업구간을 결정하였다.

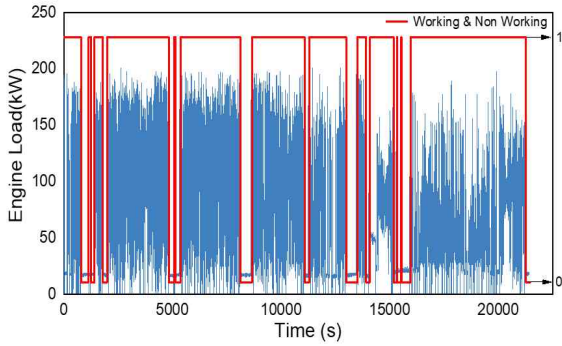


Fig. 5 Determination of valid working area of actual construction site data

### 3. 시험 결과 및 고찰

#### 3.1 부하율 및 배출계수 분석

Fig. 6은 건설현장에서 측정된 15일간의 CAN 데이터를 기반으로 작업과 비작업구간 비율, 하루 평균 LF 및 질소산화물 배출계수를 분석한 것이다. 1일~5일차까지는 다른 작업일에 비해 비작업구간의 비율이 높으며, 그로 인해 LF가 낮은 것을 알 수 있다. 하지만 10~12일차의 경우 비작업구간의 비율이 증가하지만 LF가 0.4에서 0.46으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 LF가 작업의 종류에 영향을 받았다고 할 수 있다. 10일차의 경우 낮은 출력을 사용하며 중간 대기 시간이 긴 시멘트 타설 작업 수행비율이 높았고, 12일차는 높은 출력을 사용하는 굴착작업 수행비율이 높았던 것을 확인하였다. 이와 같이 LF는 작업의 유형과 유효작업구간의 비율에 의해 결정됨을 알 수 있다. 특히 이때의 질소산화물 배출 특성을 분석해 보면 10일차 1.19 g/kWh, 11일차 0.09 g/kWh, 12일차 1.0 g/kWh로 LF의 변화와는 상관성이 낮은 것을 알 수 있다.

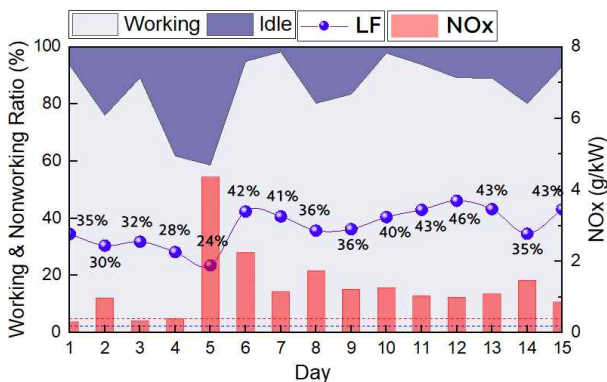


Fig. 6 Comparison of LF and EF values according to effective work section

LF에 따른 EF를 분석해 보면 동일한 LF 0.36을 보이는 8일차와 9일차의 EF가 극명한 차이를 보이는데 이 차이를 설명하기 위해 Fig. 7에 실제 작업 엔진출력 LF 프로파일을 나타내었다. EF가 낮게 나온 9일차의 경우 비작업구간 비율이 16%였으며, 8일차는 20%로 차이가 크지 않지만 8일차의 경우 작업 시작 구간에서 엔진이 충분히 예열될 만큼 작업량이 많지 않았고, 대기 시간이 긴 특징이 있었다. 이로 인해 EF는 LF보다 작업의 종류와 엔진 냉각 후 재시동을 해야 하는 휴식 시간에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 후처리 장치의 예열이 실제 배출량에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 상세한 작업 구간 비율 및 LF, EF는 Table 3에 나타내었다.

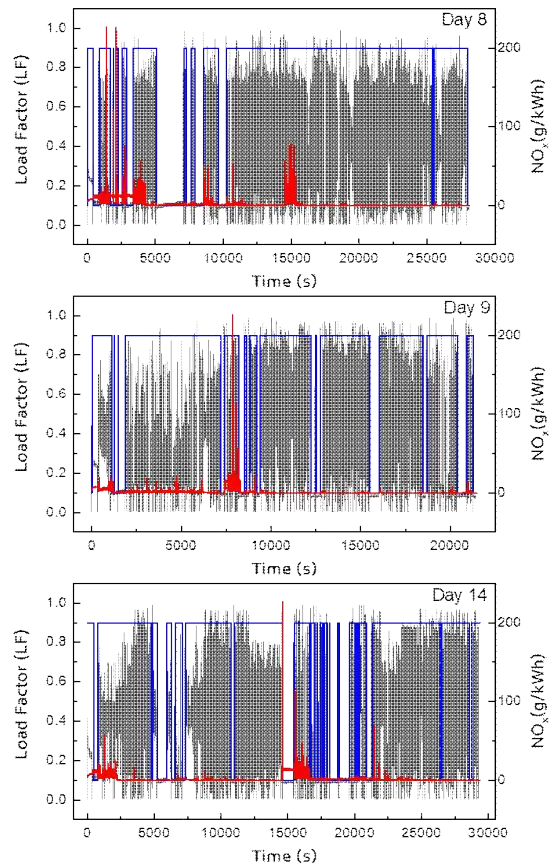


Fig. 7 Analysis of engine load characteristics from sequential data

Table 3 List of LF and EF, Working & Non-Working Ratio

	Day8	Day9	Day14
LF	0.358	0.363	0.347
EF (g/kWh)	1.85	1.07	1.7
W/N (%)	20/80	16/84	20/80

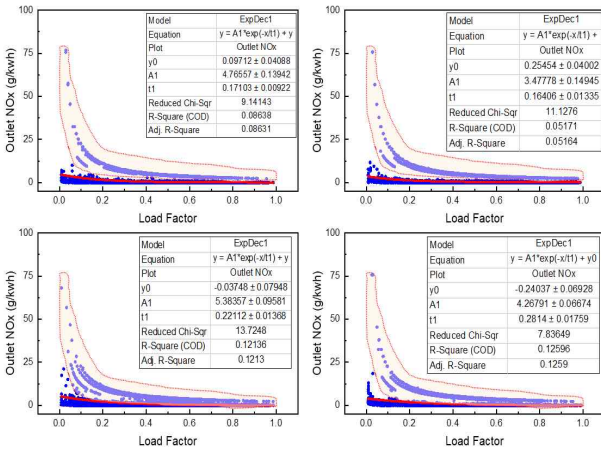


Fig. 8 EF characteristics that decrease exponentially as LF increases

### 3.2 엔진출력에 따른 질소산화물 배출특성 분석

3.1절에서는 하루 평균 부하율을 시계열 데이터로 분석하고, 유효작업구간과 LF 및 EF사이의 관계에 대해 분석하였다.

결과적으로 시계열 데이터 분석을 통해 EF는 LF 보다는 작업의 종류 및 후처리 장치 예열 상태에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 그럼에도 불구하고 EF와 LF의 상관관계를 분석하기 위해 x축을 LF, y축을 EF로 하여 8일, 9일, 13일, 14일차를 Fig. 8로 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 질소산화물 EF는 배출량을 출력으로 나눈 값이기 때문에 LF가 커질수록 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 후처리장치가 원활히 작동하여 모든 구간에서 질소산화물의 배출량이 일정하게 배출되기 때문이며, 작업조건 및 환경에 따라 다른 추세값을 보여준다. 또 다른 그래프의 특징으로 배출 영역이 구분되는 것인데, 그래프에 표기한 빨간 영역은 후처리장치가 예열되기 전에 발생하는 배출가스 영역이고, 나머지 영역은 후처리장치 예열이 끝나고 일반적인 작업을 하는 구간으로 앞서 Fig.7 에서 분석한 결과와 마찬가지로 엔진 냉간 운전구간의 배출량이 배출계수에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

### 3.3 실제 건설현장 굴착기의 질소산화물 배출 특성 결과

Fig. 9은 건설현장에서 작업일자별 굴착기의 질소산화물 배출특성을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 오른쪽 마지막에 PEMS로 측정된 결과를 나타내었다. PEMS 데이터는 같은 모델에 PEMS를 설치하여 전문 시험장에서 굴착, 평탄화, 주행 실동작 시험을 진행하여 취득하였다. 1일차부터 15일차까지 배출량은 실

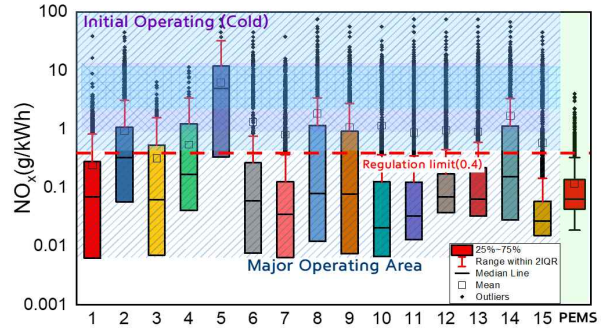


Fig. 9 Nitrogen oxide characteristics of actual construction site excavators

제 건설현장에서 OBD를 통해 계측하였다. OBD단자를 이용해 계측한 실제 건설현장의 질소산화물 배출량은 PEMS를 사용해 측정된 배출량보다 높게 측정되었지만 PEMS 시험은 엔진 예열을 한 후 측정을 시작했기 때문에 엔진 냉간구간을 제외하면 유사한 배출량으로 측정되는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 후처리 장치 예열 전, 비작업구간에서 주로 배출계수가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 Box Plot 분석을 통해 데이터의 75%인 Box영역은 일부 비작업구간 비율이 높은 날을 제외하고 주사용 영역에서 나타나며, 점으로 표시되는 극단치로 나타나는 엔진 냉간구간을 제외하면 대부분의 작업영역에서 배출가스 규제를 만족한다. Fig. 6와 Fig. 9를 비교해보면 하루 평균 LF가 0.4 이상으로 측정되는 비작업구간이 적고 출력이 높은 작업을 수행한 날에 배출계수가 더 낮게 나온 것을 알 수 있다.

Fig.10는 하루 평균 배출계수를 함께 평균, 작업구간 평균, ISM 방식으로 엔진의 냉간시동구간을 제외한 평균 3가지로 구분하여 비교하였다. 합계평균은 1.3 g/kWh, 작업구간 평균은 1.0 g/kWh, ISM 평균은 0.61 g/kWh로 비작업구간을 제외했을 때 0.3 g/kWh의 배출계수가 감소했고, 여기에 엔진 냉간시동구간까지 제외하면 0.69 g/kWh의 배출계수가 감소함을 알 수 있었다. 하지만 3가지의 경우 모두 실제 배출량을 산정할 때 사용하는 배출계수인 0.191 g/kWh보다 큰 것을 확인하였다. 실제 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)에서 사용하는 배출계수는 엔진 동력계시험을 통해 산출되기 때문에 엔진 시동 초기구간과 냉간구간을 모사하지 못한다는 단점이 있다.<sup>12)</sup> 건설현장에서의 작업 중 ISM 방식으로 계산한 배출계수가 현재 사용하는 배출계수와 유사함을 알 수 있다. 이를 토대로 각 시험일의 EF와 LF를 통해 배출량을 모의 산정하였다.

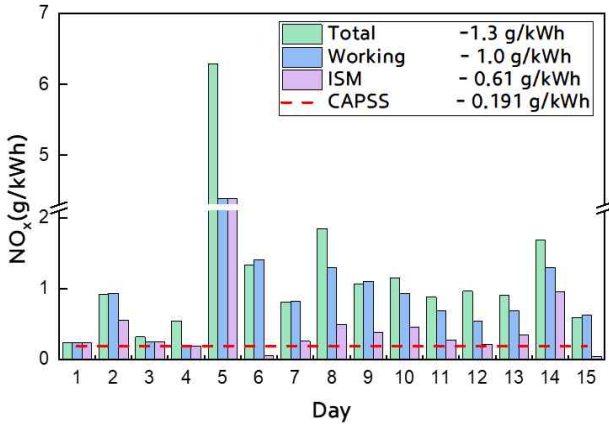


Fig. 10 Comparison of emission factors for three calculation methods

### 3.4 배출량 모의 산정

본 연구에서는 굴착기의 배출량을 산정하기 위해 굴착기의 배출량에 영향을 미치는 요소들을 분석하였고, 식 (1)을 통해 모의 배출량을 산정하였다.

건설현장에서의 LF는 0.24~0.46으로 CAPSS에서 사용하는 0.48보다 상대적으로 낮은 값을 나타내었음에도 불구하고 높은 배출계수로 인해 현재 계산식보다 배출량이 높게 나타났다. 각 작업일의 배출량은 Fig. 11과 Fig. 12에 나타났다. 하루 평균 EF 1.3 g/kWh를 사용한 Fig. 11을 보면 30톤급의 시험용 굴착기의 경우 최소 0.03 kg에서 최대 2.8 kg까지 질소산화물을 배출하고, 작업구간의 평균값 1.0 g/kWh를 사용해서 배출량을 계산한 Fig. 12를 보면 최소 0.02 kg에서 최대 1.2 kg을 배출하는 것을 알 수 있다. 이렇게 계산한 하루 배출량 평균에 굴착기 등록대수(3만대)<sup>24)</sup>와 연간 작업일수(173일)<sup>25)</sup>를 곱해 계산해 보면 약 540만 kg으로 나타난다.

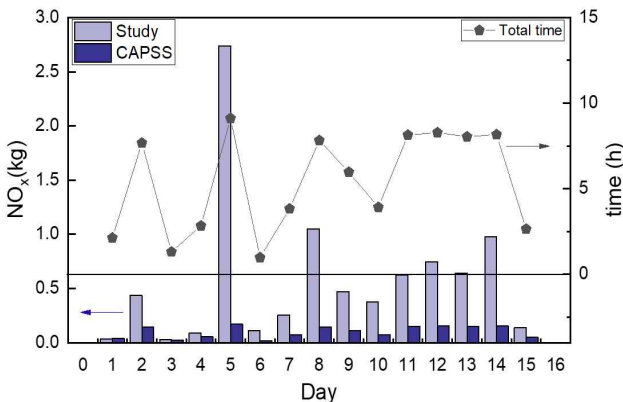


Fig. 11 Result of emission simulation calculation using total emission factor

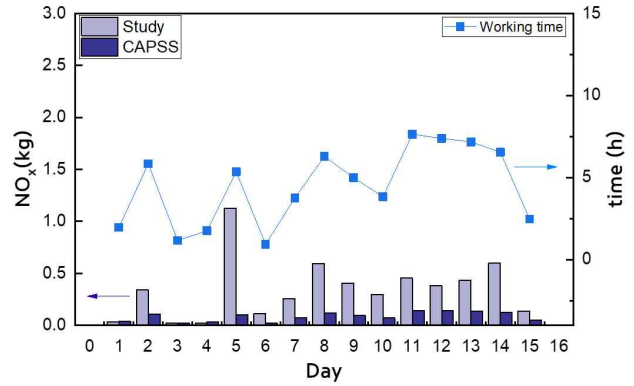


Fig. 12 Result of emission simulation calculation using working emission factor

## 4. 결론

본 연구에서는 건설기계 배출량 산정 방법을 개선하기 위해 실제 건설현장에서 사용되는 굴착기의 데이터를 측정하여 LF에 따른 EF의 특성을 분석하였다. 실험 결과를 통해 LF와 배출가스 간의 관계, 작업 유형에 따른 배출량의 변화, 후처리 장치의 영향 등을 파악하였다.

1) LF와 배출가스 사이의 상관관계를 분석한 결과, 질소산화물 배출계수는 LF가 커질수록 지수 함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 엔진 냉간구간에서 발생하는 배출가스는 후처리 장치가 예열되기 전에 발생하는 것으로 확인되었다. 이를 통해 엔진 냉간구간의 배출량이 배출계수에 미치는 영향이 크다는 사실을 확인할 수 있었다.

2) 실제 건설 현장에서 측정한 데이터를 기반으로 PEMS를 통해 실제 측정한 배출량과 OBD 단자를 이용한 계측 결과를 비교하였다. 실제 측정 결과는 엔진 예열 후에 측정이 시작되었다. 따라서 실제 배출량은 엔진 냉간구간을 제외한 유사한 배출량으로 측정되었다. 또한, 작업 구간에서는 규제 범위 내에서 질소산화물을 배출함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 후처리 장치 예열 전, 비작업구간에서 주로 배출계수가 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 배출계수를 줄이기 위해서는 엔진 냉간 시 작업을 지양하고, 비작업 구간을 줄이는 최적 작업계획을 세워야 한다.

3) 하루 평균 배출계수를 합계 평균, 작업 구간 평균, ISM 방식으로 계산하여 비교한 결과를 분석하였다. 결과적으로, 비작업 구간을 제외했을 때 배출계수가 0.3 g/kWh 감소하였고, 엔진 냉간구간까지 제외하면 0.69 g/kWh의 배출계수 감소가 나타났다. 하

지만 모든 경우에서 현재 사용되는 배출계수인 0.191 g/kWh보다 큰 값을 확인할 수 있었다. 이는 실제 CAPSS에서 사용되는 배출계수가 엔진 동력 시험을 기반으로 산출되어 엔진 시동 초기 구간과 냉간구간을 충분히 모사하지 못한다는 한계를 가지고 있음을 알 수 있었다.

따라서 건설기계의 정확한 질소산화물 배출량을 산정하기 위해 실제 건설기계 시험을 통해 부하율을 현실화 및 세분화해야 하며 엔진 냉각 구간이 포함된 배출계수를 개발하여 산정식에 적용해야 한다.

### 후 기

이 연구는 2022년 환경부 국가미세먼지정보센터의 용역과제 ‘농업기계 및 건설기계 배출량 산정방법 개선(II)’ 연구와 한국연구재단 중견연구후속지원사업(RS-2023-00208502)의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

### 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

### References

- 1) R. Biesbroek, K. Bowen, and J. Lawrence, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability”, 2022.
- 2) A. Montazeri, A. J. Lilienthal, and J. D. Albertson, “A spatial land use clustering framework for investigating the role of land use in mediating the effect of meteorology on urban air quality,” *Atmospheric Environment: X*, vol.12, 100126, 2021.
- 3) S. E. Lee, T. J. Ki, Y. J. Ki, R. G. Li, and W. S. Kim, “Analysis of Engine Load Factor for Agricultural Cultivator during Plow and Rotary Tillage Operation” *Journal of Drive and Control*, vol.20, no.2, pp.31-39, 2023.
- 4) J. P. Cha, Y. S. Yu, D. Lee, and M. S. Chon, “RDE Characteristics of Euro 6 Light Duty Diesel Vehicles Regarding to Driving Conditions,” *Journal of ILASS-Korea*, vol.22, no.4, pp.218-224, 2017.
- 5) W. Y. Chung, J. Y. Ko, C. L. Myung, S. J. Kwon, Y. H. Seo, and S. S. Park, “Effect of weight increment on PN emission from a GDI vehicle over RDE(Real Driving Emission),” *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.35-37, 2017.
- 6) J. P. Cha, S. I. Jo, H. J. Kim, S. I. Kwon, J. H. Keel, J. T. Lee and S. H. Park, “Study on the Improvement of Test Route for Real Driving Emissions Test of Ultra-Heavy-Duty Vehicle,” *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol.29, no.8, pp.789-796, 2021.
- 7) S. Abolhasani, H. C. Frey, K. Kim, W. Rasdorf, P. Lewis, and S. H. Pang, “Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: A case study for excavators,” *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol.58, no.8, pp.1033-1046, 2008.
- 8) X. Li, L. Yang, Y. Liu, C. Zhang, X. Xu, H. Mao and T. Jin “Emissions of air pollutants from non-road construction machinery in Beijing from 2015 to 2019,” *Environmental Pollution*, vol.317, 2023.
- 9) J. Chen, Y. Li, Z. Meng, X. Feng, J. Wang, H. Zhou, J. Li, J. Shi, Q. Chen, H. Shi and S. Wang “Study on Emission Characteristics and Emission Reduction Effect for Construction Machinery under Actual Operating Conditions Using a Portable Emission Measurement System (Pems),” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol.19, no.15, 2022.
- 10) C. D. Desouza, D. J. Marsh, S. D. Beevers, N. Molden, and D. C. Green, “Real-world emissions from non-road mobile machinery in London,” *Atmospheric Environment*, vol.223, 2020.
- 11) Z. Peng, Y. Ge, J. Tan, M. Fu, X. Wang, M. Chen, Y. Ru and Y. Wu “Real-world emission from in-use construction equipment in China,” *Aerosol and Air Quality Research*, vol.16, no.8, pp.1893-1902, 2016.
- 12) National Air Emission Inventory and Research Center, “National Air Pollutant Emission Inventory,” 2019.
- 13) I. R. Chung, J. C. Kim, J. H. You, S. H. Hwang, C. S. Lim, H. Y. Lee, J. M. Kim, Y. C. Han and B. Y. Song, Motor Vehicle Emission Research Laboratory, “A study on the reduction of pollutant

- Emission by diesel engine” 1997.
- 14) T. Cao, T. D. Durbin, R. L. Russell, D. R. Cocker, G. Scora, H. Maldonado and K. C. Johnson, “Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment,” *Atmospheric Environment*, vol.147, pp.234-245, 2016.
  - 15) California Air Resources Board [CARB], “Appendix D: OSM and Summary of Off-road Emissions Inventory Update”, 2011
  - 16) R. Giannelli, C. Fulper, C. Hart and D. Hawkins, “In-use emissions from non-road equipment for EPA emissions inventory modeling (MOVES)” *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, vol.3, no.1 pp. 181-194, 2010.
  - 17) S. Y. Baek, S. M. Baek, H. H. Jeon, J. H. Lee, W. S. Kim, Y. J. Kim, “Design Verification of an E-driving System of a 44 kW-class Electric Tractor using Agricultural Workload Data,” *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, pp.36-45, 2022.
  - 18) J. H. Cho, S. J. Na, M. S. Kim, M. K. Park, “Development of an Unmanned Test System Based on Forklift for Mast Operation Durability,” *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, pp.70-76, 2022.
  - 19) D. J. Kim, J. T. Chung, C. S. Lee, C. H. Song, “Transfer Force and Contribution Analysis of Cone Crusher,” *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, pp.77-84, 2022.
  - 20) J. H. Lee, H. H. Jeon, S. Y. Baek, S. M. Baek, W. S. Kim, Md. Abu Ayub Siddique, Y. J. Kim, “Analysis of Emissions of Agricultural Tractor according to Engine Load Factor during Tillage Operation,” *Journal of Drive and Control*, Vol.19, No.4, pp.54-61, 2022.
  - 21) H. H. Jeon, S. M. Baek, S. Y. Baek, Y. S. Hong, T. J. Kim, Y. Choi, Y. K. Kim, S. H. Lee, Y. J. Kim, “Development and Validation of Simulation Model for Traction Power and Driving Torque Prediction of Upland Multipurpose Platform,” *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.1, pp.16-26, 2023.
  - 22) G. H. Kim, H. H. Hwang, B. C. Jeong, C. S. Park, B. Y. Kim and D. W. Kang, “A study on the development of Electric Excavator Communication System based on SAE J1939 protocol,” *The Korean Society Of Automotive Engineers*, p. 1200, 2021.
  - 23) Official Journal of the European Union, “COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2017/655 of 19 December 2016”, 2016
  - 24) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Report on Major Statistics of Construction Machinery”, 2022.
  - 25) Korea Research Institute for Human Settlements, “Improvement of Supply and Demand Control Policy for Construction Machinery”, 2016.