

PEMS를 이용한 농업용 트랙터의 배기가스 배출계수 평가 Evaluation of exhaust emissions factor of agricultural tractors using portable emission measurement system (PEMS)

김완수^{1,2} · 이시연¹ · 백승민³ · 백승윤³ · 전현호³ · 김택진⁴ · 임류갑⁵ · 최장영⁶ · 김용주^{3,7*}
Wan-Soo Kim, Si-Eon Lee, Seung-Min Baek, Seung-Yun Baek, Hyeon-Ho Jeon,
Taek-Jin Kim, Ryu-Gap Lim, Jang-Young Choi, Yong-Joo Kim

Received: 14 Aug. 2023, Revised: 23 Aug. 2023, Accepted: 26 Aug. 2023

Key Words : Agricultural tractor(농업용 트랙터), non-road mobile machinery(비도로용이동식기계), Exhaust(배기가스), Emission factor(배출계수), Portable emissions measurement system(이동식 배출가스 측정장치)

Abstract: The aim of this study was to measure and evaluate the exhaust emission factors of agricultural tractors. Engine characteristics and three exhaust emissions (CO, NO_x, PM) were collected under actual agricultural operating conditions. Experiments were performed on idling, driving, plow tillage, and rotary tillage. The load factor (LF) was calculated using the collected engine data, and the emission factor was analyzed using the LF and exhaust emissions. The engine characteristics and exhaust emissions were significantly different for each working condition, and in particular, the LF was significantly different from the currently applied 0.48 LF. The data distribution of exhaust emissions was different depending on the engine speed. In some conditions, the emission factor was higher than the exhaust emission standards. However, since most emission limit standards are values calculated using an engine dynamometer, even if the emission factor measured under actual working conditions is higher, it cannot be regarded as wrong. It is expected that the results of this study can be used for the inventory construction of a calculation for domestic agricultural machinery emissions in the future.

기호 설명

DR : deviation ratio

* Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

1 Major in Bio-Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

2 Upland Field Machinery Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

3 Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

4 Department of Drive System Team, TYM R&D Center, Iksan 54576, Korea

5 Department of Smart Agriculture, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan 54667, Korea

6 Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

7 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, 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.

E : emission (kg/year)

EF : emission factor (g/kWh)

EL : emission factor standards (g/kWh)

EP_a : engine power according to actual work (kW)

EP_r : engine rated power (kW)

HRS : annual operating hours (h/year)

N : number of machines (ea)

S : standard deviation

CAN : controller area network

CAPSS : clean air policy support system

DCM : diffusion charging method

FGM : filter gravimetric method

HCLD: heated chemiluminescence detector

LF : load factor

NDIR : non-dispersive infrared absorption

NRMM : non-road mobile machinery

PEMS : portable emissions measurement system

RSD : relative standard deviation

SCR : selective catalyst reduction

1. 서론

전 세계적으로 환경오염에 대한 위기의식이 높아지고 있으며, 이와 관련하여 각종 환경규제가 시행되고 있다.¹⁾ 특히 건설기계 및 농업기계를 포함하는 비도로용이동식 기계(Non-road mobile machinery, NRMM)에 장착되는 원동기에 대한 배기가스 규제가 점차 강화되고 있다.²⁾ 이에 반해 국내 전체 대기오염물질 배출량에서 철도, 선박, 항공, 건설기계 및 농업기계를 포함하는 배출원대분류인 비도로이동오염원이 차지하는 비율은 '13년 11.9%에서 '17년 25.3%로 점차 증가하고 있다.³⁾ 특히, 비도로이동오염원은 2017년 전체 국가 대기오염물질 중 약 22%의 일산화탄소(CO)와 26%의 질소산화물(NO_x)을 배출하는 등 국내 대기오염물질 배출에 큰 비율을 차지한다.³⁾

비도로이동오염원 중 농업기계는 농작업 특성에 따라 비정형 환경인 토양을 주행하며, 동시에 농작업을 수행해야 한다.⁴⁾ 대표적인 농업기계 기종인 트랙터는 다양한 농작업에 범용적으로 활용이 가능하여⁵⁻⁶⁾, 해당 작업면적 21.7ha/대, 연간 작업일수 35.6일로 주요 농업기계 가운데 가장 높은 수치를 보인다.⁷⁾ 트랙터는 주행과 동시에 부착된 작업기를 견인하거나 동력을 공급하며 농작업을 수행하기 때문에 부하 변동이 심한 열악한 환경에서 운용되며,⁸⁾ 이러한 부하 변동은 배기가스에 직접적인 영향을 미친다.⁹⁾

국내 대기오염물질 배출량은 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 활용하여 산정되고 있다.¹⁰⁾ 국내 배출원별 대기오염물질의 배출량 자료는 국가 대기오염물질 관리 정책을 수립하기 위해 중요한 정보이다.¹¹⁾ 하지만, 현재 CAPSS에서 관리하고 있는 농업기계 배출량은 국내 자료와 미국 EPA 등에서 개발한 배출계수를 기반으로 농업기계 보유대수, 부하율 등을 이용하여 산출하고 있다.³⁾ 이는, 정확도가 낮을 뿐만 아니라 데이터의 신뢰성 확보가 어려우며, 실 작업조건을 반영한 배출량 산정이 불가능하다.¹²⁾ 이에 대한 대안으로 미국, 유럽 등에서는 이동형 배기가스 측정장치(Portable Emissions Measurement System, PEMS)를 이용한 실차 모니터링을 수행하고 있다.¹³⁻¹⁵⁾ 농업기계와 함께 NRMM으로 분류되는 건설기계분야에서도 PEMS를 이용한 실차 조건에서의 배기가스 배출량 데이터를 계측한 연구

가 일부 보고되었다.¹⁶⁻¹⁷⁾ Kim and Lee (2017)는 굴착기의 실 작업조건(무부하, 부하상태)에서 PEMS를 이용하여 배기가스 데이터를 수집하고 엔진 부하와 배기가스 배출특성 요인들과의 상관관계를 분석하여 CO₂ 배출량을 산정하였으며, 연구를 통해 산정된 CO₂ 배출량과 현행 적용 중인 배출계수를 기반으로 산출된 CO₂ 배출량과의 차이를 비교 분석하였다.

농업기계 분야에서도 미국, 유럽 등의 일부 연구자들에 의하여 PEMS 장비를 이용한 트랙터 배기가스 배출량 계측 연구가 수행되었다.¹⁸⁾ Merksiz et al. (2015)는 실제 농작업에 따른 트랙터의 CO₂ 배출량을 계측하기 위하여 PEMS를 이용한 계측 시스템을 구축하고 세 개의 속도 조건(5, 10, 15 km/h)에서 실험을 수행하였다. 10 km/h 조건에서 CO₂의 단위 면적당 배출량이 18.8 kg/ha로 가장 높게 나타났다고 보고하였다.¹⁸⁾ 국내에서도 트랙터 배기가스 배출량을 추정하는 연구가 수행되었다.⁹⁾ Beak et al. (2020)은 엔진 토크 및 연료소모량을 측정하여 트랙터 경운작업 시 SO_x와 NH₃의 배출량을 이론식을 통해 산출하였다. 산출된 SO_x 및 NH₃ 배출량은 플라우 작업 시 로터리 작업보다 높은 값을 보였고, 로터리 작업 시 플라우 작업보다 더 넓은 데이터 분포를 보이는 것으로 보고되었다.⁹⁾ Lee et al. (2022)는 엔진 토크 및 회전속도를 측정하여 실시간 부하율을 산출하였고, 현행 국가 대기오염물질 배출량 산정방법에서 제시한 CO, THC, NO_x, PM 배출계수를 이용하여 계측된 부하율과 현행 적용 중인 부하율(0.48)에 따른 배출량을 각각 산출하였다. 그 결과, 계측된 부하율에 따른 배출량 값이 더 높게 나타났다고 보고하였다.¹⁹⁾ 하지만, 아직까지 국내에서는 실차 조건에서 PEMS 등을 이용하여 배기가스 배출량을 계측한 사례는 미비하며, 수식을 통해 배출량을 추정하는 일부 연구만 수행되었다.²⁰⁾ 따라서, 실제 주요 농작업 시 발생하는 트랙터의 배기가스 배출량을 계측함으로써 신뢰성 있는 대기오염물질별 배기가스 배출계수를 산정하는 연구가 요구된다.

본 연구의 목적은 주요 작업에 따라 농업용 트랙터의 엔진 특성, 배기가스 배출량을 계측하고 이를 기반으로 배출계수를 평가하는 것이다. 세부 연구목표는 1) 트랙터 엔진 특성 및 배기가스 계측 시스템 개발, 2) 공회전, 노지 주행, 플라우 경운 및 로터리 경운작업에 따른 트랙터 엔진 특성 및 배기가스 배출량 계측, 3) 계측된 실 작업 데이터 기반 엔진 특성 매핑 및 배출계수를 평가하는 것이다.

2. 데이터 계측 시스템

2.1 시험대상 트랙터

트랙터 엔진 특성 및 배기가스 계측을 위하여 4륜 구동형 트랙터를 사용하였다. 사용된 트랙터의 크기 및 공차중량은 각각 4,020(L) × 2,270(W) × 2,790(H) mm 및 4,000 kg이다. 트랙터의 최대 견인력은 주행 속도 2.08 km/h에서 26.18 kN이다.

시험대상 트랙터에 탑재된 엔진은 Tier-4 환경규제를 만족하는 디젤 엔진이다. 엔진 배기량은 3,409 cc이며, 압축비는 17:1이다. 트랙터 정격토크 및 정격출력은 정격 엔진 회전속도인 2,200 rpm에서 각각 290 Nm, 67 kW이다. 사용된 트랙터에는 선택적 촉매 환원(Selective Catalyst Reduction, SCR)이 장착되어 있다. 트랙터의 자세한 제원은 Table 1과 같으며, 엔진 성능곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 3 Specification of the tractor

Items	Specifications	
Dimension	4,020×2,270×2,790	
Weight	4,000 kg	
Engine	Type	In-lined 4 stroke 4 cylinder
	Fuel	Diesel
	Rated speed	2,200 rpm
	Bore × Stoke	98 × 113 mm
	Displacement (cc)	3,409
	Compression ratio	17:1
	Max. power	67 kW@ 2,200 rpm
	Max. torque	380 Nm@ 2,200 rpm
	After-treatment system	SCR
	Emission standard	Tier-4

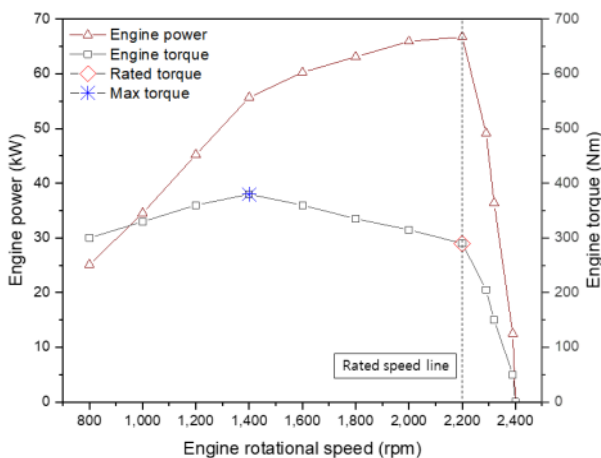


Fig. 1 Engine characteristic map of tractor used in this study

2.2 계측 시스템

트랙터 계측 시스템은 주요 농작업에 따른 엔진 특성과 배기가스를 계측하기 위하여 Fig. 2와 같이 구성되었다. 트랙터 엔진 특성(토크, 회전속도, 동력, 연료소모량)은 J1939 프로토콜에 따라, Controller Area Network (CAN) 통신을 통해 실시간으로 수집되었다.

주요 농작업 시 실차 조건에서 트랙터 배기가스 데이터 수집을 위하여 PEMS를 사용하였다. 사용된 PEMS (OBS-one, Horiba, Kyoto, Japan)는 자동차, 건설기계, 농기계 등 다양한 산업분야에 사용되고 있는 On-board 배기가스 측정 시스템으로 CO, NO_x, PM 배출량 등을 측정할 수 있다. PEMS는 Gas 모듈과 PM 모듈로 구분되며, Gas 모듈을 통해 CO, NO_x 등을 측정할 수 있으며, PM 모듈을 통해 PM을 측정할 수 있다. 이때, 배출가스 산출방법의 경우 CO는 비분산적외선법(Non-Dispersive Infrared, NDIR), NO_x는 가열식 화학발광분석법(Heated Chemiluminescence Detector, HCLD), PM은 필터 중량법(Filter gravimetric method, FGM) 및 확산 충전법(Diffusion charging method, DCM)을 따른다.

사용된 PEMS 장비는 농작업 중에 발생하는 분진 등으로부터 보호함과 동시에 트랙터에 부착할 수 있도록 Fig. 3과 같이 별도의 지그를 가공하여 트랙터 전방 웨이트 자리에 설치하였다. 이때, PEMS의 무게는 약 100kg이며, 지그는 약 200 kg이다.

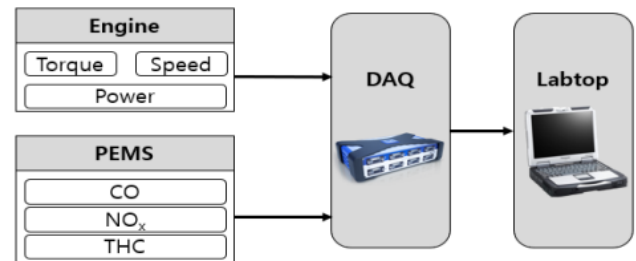


Fig. 2 Schematic diagram of data measurement



Fig. 3 PEMS installed to the tractor

2.3 데이터 수집을 위한 필드시험

데이터 계측을 위한 필드시험은 Fig. 4와 같이 공회전, 노지 주행, 플라우 및 로터리 경운작업을 대상으로 수행되었다. 사용된 작업기는 8륜 플라우(WJSP-8, Woongin Machinery Co., Ltd., Gimje, Korea) 및 로터베이터(N225, Celli SpA, Forli, Italy)이다. 주행 속도는 노지 주행 시 2~10 km/h, 플라우 경운작업 시 5.95 km/h, 로터리 경운작업 시 3.66 km/h 수준으로 진행하였다.



Fig. 4 Field experiment of the tractor for measuring exhaust gas emissions

통합 농작업 사이클은 공회전, 노지 주행, 플라우 및 로터리 경운작업을 통해 수집된 데이터에 가중치를 고려하여 생성되었다. 분석에 사용된 작업조건별 가중치와 그에 따라 분석에 사용된 데이터 수는 Table 2와 같다.

Table 4 Weight factor and number of data by tractor operation types

Operation types	Weight factor (%)	Number of data
Idling	10	3,001
Driving	20	5,974
Plow tillage	35	10,664
Rotary tillage	35	10,337

2.4 부하율 분석

수집된 트랙터 주요 농작업에 따른 엔진 특성 데이터는 각 작업의 엔진 특성 차이를 평가하기 위해 IBM SPSS Statistics (SPSS 25, SPSS Inc., New York, USA)를 사용하였다. 평균값에 대한 비교는 일원분산분석(One-way ANOVA) 후 LSD (Least Significant Difference)를 통해 사후검증을 수행하였고, 각 작업간의 유의성을 p<0.05 수준에서 검정하였다. 또한, 수

집된 엔진 특성 데이터를 활용하여 부하율(Load factor, LF) 분석을 수행하였다. LF는 엔진 정격출력 대비 실제로 출력을 어느 정도 사용하는지를 나타내는 중요 지표이다. 이는, 배출량과 함께 대기오염물질 배출계수 산출 시 사용된다.¹²⁾ 현재 농업기계 분야에서는 기종, 연식 등의 조건에 관계없이 부하율을 0.48로 일괄적으로 적용하고 있어 현행화가 요구되고 있다.²¹⁾ 본 연구에서는 실제 농작업에 따라 계측된 출력 데이터를 이용하여 식 (1)을 기반으로 LF를 산출하였다.

$$LF = \frac{EP_a}{EP_r} \tag{1}$$

여기서 LF는 부하율, EP_a은 실제 작업에서 발생하는 엔진 출력(kW), EP_r은 엔진 정격출력(kW)을 나타낸다.

2.4 데이터 분석 방법

현행 국내 트랙터를 포함한 농업기계 배출량은 환경부 국가미세먼지정보센터에서 CAPSS를 통해 산출 및 관리하고 있다.³⁾ CAPSS는 배출량 산출을 위하여 아래 식 (2)와 같이 보유대수, 엔진 정격출력, 부하율, 연간가동시간, 배출계수를 이용한다. 이때, 보유대수는 한국농기계공업협동조합과 한국농업기계학회에서 매년 발간하는 농업기계연감 자료를 이용하며⁷⁾, 연간가동시간과 같은 활동도 자료는 농업기계 이용실태(국립농업과학원) 자료를 활용한다.²²⁾ 부하율은 전체 농업기계에 일괄적으로 0.48을 적용하고 있다.¹²⁾ 농업기계 대기오염물질별 배출계수는 환경부 국가미세먼지정보센터에서 발간하는 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(IV)에서 제시하는 값을 사용한다.²³⁾ 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람에서는 배출계수를 Table 3과 같이 12년식 이전(~Tier-2), 13~14년식(Tier-3), 15년식 이후(Tier-4)로 구분하고 있다. 여기서 Tier-3, Tier-4 기준은 원동기 출력(kW) 구간별로 배출계수를 다르게 규정하고 있다. 하지만, 아직까지 농업기계 정격출력별 등록대수 자료 수집의 한계로 12년식 이전 배출계수만을 사용하고 있는 실정이다.²³⁾

$$E = \sum \frac{N \times EP_r \times LF \times HRS \times EF}{10^3} \tag{2}$$

Table 5 Emission factor of agricultural machinery by regulation stages.

Regulation stage	Applicable model year	Emission factor (g/kWh)*		
		CO	NO _x	PM
~Tier-2	~2012	2.48	7.84	0.39
Tier-3	2013~2014	2.56	3.35	0.28
Tier-4	2015~	0.071	0.188	0.016

* In Tier-3 and Tier-4, the emission factor depends on the engine power, and the above values are based on a 67 kW engine.

여기서 E 는 배출량(kg/year), N 은 보유대수(ea), EP_r 은 엔진 정격출력 (kW), HRS 는 연간가동시간 (h/year), EF 는 배출계수(g/kWh)를 나타낸다.

본 연구에서는 표본 집단의 평균에 대비한 표준편차를 분석하기 위하여 식 (3)과 같이 상대표준편차 (relative standard deviation, RSD)를 사용하였다.

$$RSD = \frac{S}{Mean} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서 RSD 는 상대표준편차(%), S 는 표준편차를 나타낸다.

계측된 트랙터 엔진 배기가스의 단위 출력당 배출량(배출계수)는 배기가스 배출허용 기준 배출계수로 나누어 DR(deviation ratio)의 비율로 분석할 수 있다. 이는 실제 농작업 시 발생하는 배출가스가 배출가스 허용기준 대비 몇 배나 더 높은 수치를 보이는지를 제시하며, 다음 식 (4)와 같이 계산된다.¹⁵⁾

$$DR = \frac{EF}{EL} \quad (4)$$

여기서 DR 는 편차비율, EF 는 필드시험을 통해 계측된 배출계수(g/kWh), EL 는 배출가스 허용기준 (g/kWh)이다. EL 은 Table 3에 제시되어 있다.

트랙터의 배출계수를 평가하기 위해 필드시험지 선정 및 계측 시스템을 구성하여 엔진 특성과 배출량을 측정하였다. 측정된 값을 기반으로 LF와 배출계수를 산출하여 작업조건별로 맵핑을 수행하였다. 최종적으로 DR 분석을 통해 계측된 배출계수와 배출계수 허용규제와 비교를 수행하였으며, 전체적인 과정은 Fig. 5와 같다.

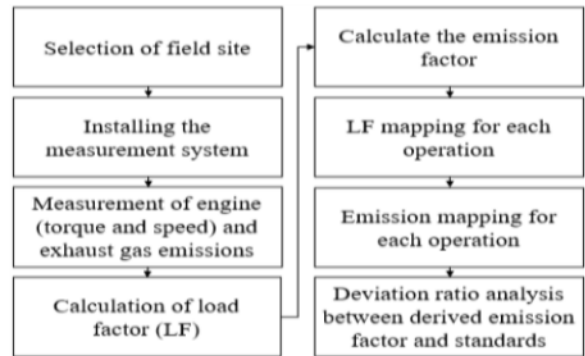


Fig. 5 The entire procedure of data analyzing

3. 결과 및 고찰

3.1 엔진 부하 프로파일

Fig. 6은 통합 트랙터 작업 사이클에 따른 엔진 특성에 대한 프로파일을 나타낸다. 공회전, 노지 주행, 플라우 경운, 로터리 경운작업에 따라 엔진 부하 프로파일은 크게 변동하는 것으로 나타났으며, 엔진 출력은 플라우, 로터리, 주행, 공회전 순으로 높게 나타났다.

Table 4는 각 작업에 따른 엔진 특성 데이터 및 통합 데이터의 통계분석 자료를 나타낸다. 엔진 출력의 RSD는 공회전, 플라우 및 로터리 경운작업 시 각각 2.05%, 0.91%, 2.12%의 값을 보였고 노지 주행 시 78.49%로 높은 값을 보였다. 이는, 노지 수행에서 더 높은 데이터의 변동성을 의미한다. 또한, 각 작업에 따른 엔진 회전속도, 토크, 출력은 모든 작업에서 유의 수준 p 값이 0.05 미만이므로 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

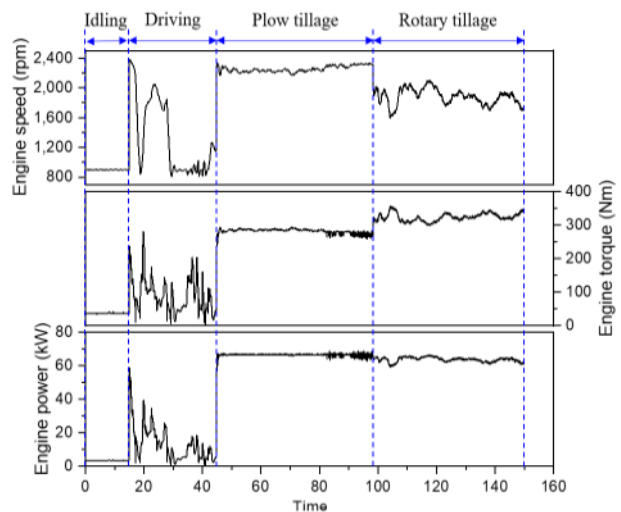


Fig. 6 Engine profile of the tractor

Table 6 Statistical description of engine characteristics by major agricultural operations

Items		E/G speed (rpm)	E/G torque (Nm)	E/G power (kW)
Idling	Max./Min.	905/897	41/34	3.84/3.24
	Avg.±Std.	900±1 ^d	38±0.79 ^d	3.54±0.07 ^d
	RSD (%)	0.16	2.10	2.05
Driving	Max./Min.	2379/808	282/3	58.7/0.28
	Avg.±Std.	1321±494 ^c	89±51.12 ^c	13.03±10.23 ^c
	RSD (%)	37.40	57.47	78.49
Plow tillage	Max./Min.	2338/2169	294/235	68.74/56.54
	Avg.±Std.	2253±40 ^a	282±5.76 ^b	66.47±0.6 ^a
	RSD (%)	1.80	2.04	0.91
Rotary tillage	Max./Min.	2222/1595	358/286	66.45/59.23
	Avg.±Std.	1883±106 ^b	323±11.84 ^a	63.61±1.35 ^b
	RSD (%)	5.66	3.66	2.12

* Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at p<0.05 by LSD multiple range test.

3.2 엔진 부하 맵

Fig. 7은 엔진 회전속도와 부하율에 따른 데이터 분포 비율을 나타낸다. 공회전 시 엔진은 약 800 rpm에서 작동하였으며, 0.1 미만의 낮은 LF를 보였다. 노지 주행 작업 시 엔진은 넓은 범위의 회전속도에서 작동하였으며, LF는 0~0.8의 넓은 범위를 보였으며, 주로 0.2 미만의 영역에서 가장 많은 데이터 분포를 보였다. 플라우 및 로터리 경운작업 시 LF는 약 0.8~1의 범위로 나타나, 높은 LF 영역에서 지속적으로 작업이 수행된 것을 알 수 있다.

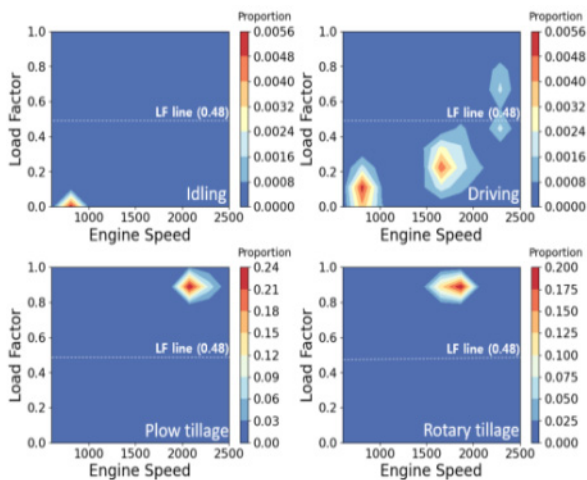


Fig. 7 Data distribution map by engine speed and load factor

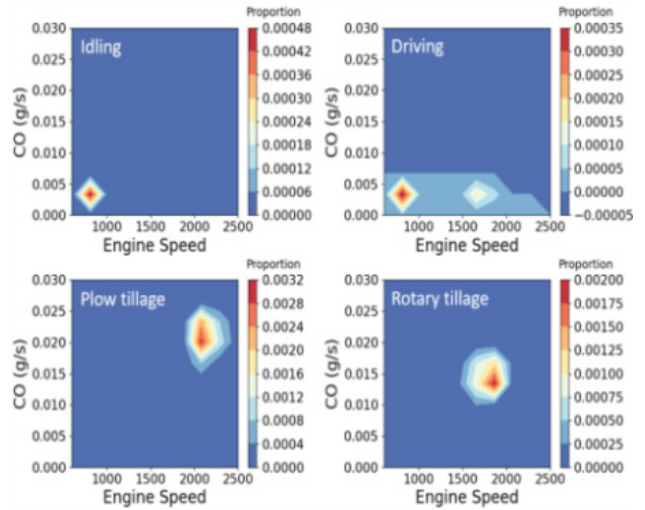


Fig. 8 Data distribution map by engine speed and CO emissions

Fig. 8은 CO 배출량 데이터 비율을 나타낸다. 공회전 시 0.005 g/s 미만의 낮은 배출량을 보였으며, 노지 주행 시 배출량의 범위는 공회전과 유사하였으나 더 넓은 엔진 회전속도 분포를 보였다. 플라우 작업 시 2,000 rpm 이상 영역에서 가장 높은 배출량을 보였으며, 로터리 작업 시 1,500~2,000 rpm 영역에서 플라우 작업 대비 낮은 배출량을 보였다.

Fig. 9는 NO_x 배출량 데이터 비율을 나타낸다. 공회전 및 노지 주행 작업 시 각각 0.015, 0.025 g/s 미만의 배출량을 보였으며, 플라우 경운작업 시 배출량은 0.02~0.05 g/s의 넓은 범위를 보였다. 반면에, 로터리 작업은 공회전과 유사하게 낮은 배출량을 보였는데, 이는, 엔진의 충분한 온도 상승으로 인하여 SCR이 작동했기 때문인 것으로 판단된다.

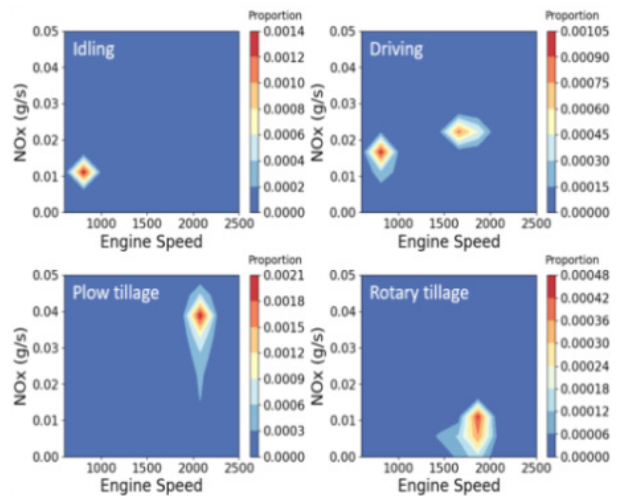


Fig. 9 Data distribution map by engine speed and NOx emissions

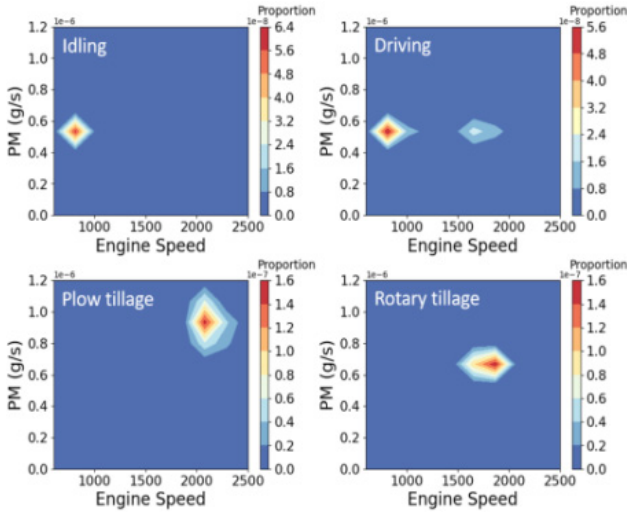


Fig. 10 Data distribution map by engine speed and PM emissions

Fig. 10은 엔진 회전속도와 PM 배출량에 따른 데이터 분포 비율을 나타낸다. 공회전 및 노지 주행 시 약 0.4~0.6E-6 g/s의 범위에서 작동하였다. 플라우 경운작업 시 배출량은 0.8E-6 g/s 이상 높은 값을 보였으며, 이때 엔진은 주로 2,000~2,200 rpm에서 작동하였다. 로터리 경운작업 시 엔진은 1,500~2,100 rpm에서 주로 작동하였으며, 이때 배출량은 약 0.6~0.8E-6 g/s의 범위를 보였다.

3.3 부하율에 따른 배기가스 배출계수 분석

Fig. 11은 LF에 따른 배출계수 데이터 플로팅 결과를 보여준다. 배출계수 산출 시 LF와 직접적으로 관련 되는 출력이 사용되므로, 배출계수와 부하율은 반비례 관계를 보인다. 따라서, CO, NO_x, PM의 배출계수는 LF가 증가할수록 지수함수적으로 감소하였다. LF가 0.1 미만일 때 배출계수 감소 폭이 가장 높았으며, 그 이후로는 점차 감소율이 낮아지는 것으로 나타났다으며, 회귀분석 결과는 Table 5와 같다.

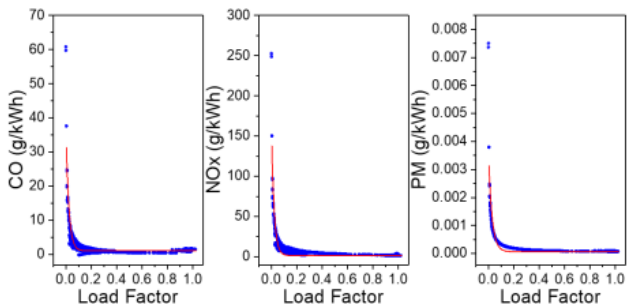


Fig. 11 Plotting results of emission factors for each exhaust by LF

Table 5 Regression analysis as an exponential function for emission factors by LF

Items	Equation	R ²
CO	$y = 36.26e^{-\left(\frac{x}{0.02277}\right)} + 1.05$	0.89
NO _x	$y = 165.91e^{-\left(\frac{x}{0.02086}\right)} + 1.34$	0.86
PM	$y = 3.57E^{-3}e^{-\left(\frac{x}{0.02775}\right)} + 6.28E^{-5}$	0.92

3.4 트랙터 배출계수 평가

트랙터 주요 농작업에 따른 배출가스 배출계수 평가 결과는 Table 6과 같다. CO, NO_x, PM 배출계수의 최댓값은 노지 주행에서 가장 큰 값을 보였으며, 배출계수의 평균은 공회전에서 가장 높은 값을 보였다. 또한, 각 작업에 따른 CO, NO_x, PM 배출계수는 모든 작업에서 유의 수준 p 값이 0.05 미만이므로 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 6에서 제시한 측정된 작업조건별 배출계수와 Table 3에서 제시한 배출규제를 비교하여 DR을 분석하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다. 여기서 DR은 각 조건에서 측정된 배출계수가 기준치 대비 어느 정도 더 높은지를 나타내는 수치로서 직관적인 비교를 가능하게 한다. CO의 DR은 ~Tier-2 및 Tier-3 기준과 비교하였을 때 공회전에서 각각 1.907, 1.847로 기준치 이상의 값을 보였지만, 그 외 조건에서 기준치 이하의 값을 보였다. 또한, Tier-4와 비교하였을 때 12.440~66.597의 값을 보이며 모든 작업조건에서

Table 6 Statistical description of exhaust emission factor of tractors by each operation

Items		Emission factor (g/kWh)		
		CO	NO _x	PM
Idling	Max.	5.153	15.245	7E-4
	Avg.±Std.	4.728±0.149 ^a	13.57±0.383 ^a	6E-4±2E-5 ^a
Driving	Max.	60.731	252.394	7.5E-3
	Avg.±Std.	2.29±3.26 ^b	9.592±12.937 ^b	3E-4±4E-4 ^b
Plow tillage	Max.	1.411	2.501	7E-5
	Avg.±Std.	1.21±0.097 ^c	0.851±0.91 ^c	5E-5±6E-6 ^c
Rotary tillage	Max.	1.043	0.69	5E-05
	Avg.±Std.	0.883±0.09 ^d	0.211±0.24 ^d	4E-5±2E-6 ^d

* Means with different superscripts (a,b,c,d) in each column are significantly different at p<0.05 by LSD multiple range test.

Table 7 Result of deviation ratio analysis of exhaust emission factor by operations based on emission regulation

Items		Deviation ratio		
		CO	NO _x	PM
Tier-2	Idling	1.907	1.730	0.0015
	Driving	0.925	1.223	0.0008
	Plow tillage	0.489	0.109	0.0001
	Rotary tillage	0.356	0.027	0.0001
	Total	0.672	0.465	0.0004
Tier-3	Idling	1.847	4.049	0.0021
	Driving	0.896	2.863	0.0011
	Plow tillage	0.474	0.254	0.0002
	Rotary tillage	0.345	0.063	0.0002
	Total	0.651	1.088	0.0005
Tier-4	Idling	66.597	72.157	0.0364
	Driving	32.314	51.019	0.0190
	Plow tillage	17.084	4.527	0.0033
	Rotary tillage	12.440	1.122	0.0027
	Total	23.48	19.389	0.0095

기준치 이상의 값으로 나타났다. NO_x의 DR은 ~Tier-2와 비교하였을 때 공회전 및 노지 주행에서 각각 1.730, 1.223으로 기준치 이상의 값을 보였고, 그 외 조건에서는 기준치 이하의 값을 보였다. Tier-3과 비교하였을 때도 공회전 및 노지 주행에서만 각각 4.049, 2.863으로 기준치 이상의 값을 보였다. Tier-4와 비교하였을 때는 1.122~72.157의 범위로 모든 작업조건에서 기준치 이상의 값을 보였다. 다만, PM의 DR은 ~Tier-2, Tier-3, Tier-4와 비교하였을 때 모든 조건에서 기준치 대비 낮은 값을 보였다.

4. 결론

본 연구는 신뢰성 있는 국내 농업용 트랙터의 배기가스 배출량 산정 및 배출계수 현행화를 위한 기초연구로써, 트랙터 공회전, 노지 주행, 플라우 경운 작업 및 로터리 경운작업에 따른 트랙터 엔진가동정보와 배기가스 배출량을 측정하고 배출계수를 평가하기 위하여 수행되었으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 국내 농업용 트랙터에 PEMS 장비를 탑재하고 공회전, 노지 주행, 플라우 및 로터리 경운작업을 대상으로 필드실험을 수행함으로써 엔진가동정보 및 배기가스 배출량 데이터를 확보하였다.

(2) 트랙터 엔진 특성(토크, 회전속도)은 작업조건별로 크게 다르게 나타났다. 이는 엔진 부하율 특성에 직접적인 영향을 미치며, 본 연구의 결과로 산출된 부하율은 현행 적용 값인 0.48과는 크게 다른 결과를 보였다.

(3) 측정된 데이터를 기반으로 각 조건별 트랙터 배기가스 배출계수를 산출하였으며, 이를 현행 적용 중인 배출허용기준과 비교분석을 수행하였다. 그 결과, 측정된 배출계수는 일부 작업조건에서 배출허용기준 대비 더 높은 수치를 보였다. 이는 배출허용기준이 대부분 엔진 동력계를 기반으로 측정된 값이기 때문에 발생한 차이일 수 있다고 판단된다. 본 연구에서 측정된 배출계수가 배출가스 허용기준 대비 높다고 하여 이를 부적합하다고 보는 것은 어렵다. 본 연구의 결과는 실제 농작업 시 발생하는 배출가스의 배출량 및 배출계수의 범위를 제시할 수 있으며, 이는 향후 국내 농업기계 배출가스에 대한 국가적 정책 수립 등에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 향후 연구에서는 트랙터의 냉간, 열간 및 SCR의 작동 유무 등에 대한 것을 고려하여 측정 및 분석을 수행할 예정이며, 다양한 작업조건(단수, 토양 조건 등) 및 농작업 종류(로터리, 베일러, 트레일러 등)별 트랙터 배기가스 배출량을 측정하고, 데이터베이스를 구축함으로써 신뢰성 있는 트랙터 배기가스 배출량 산정을 위한 연구를 지속할 예정이다.

후 기

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업(122047-03 및 122033-2)의 지원을 받아 수행된 연구임.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

1) J. U. Lee and S. H. Han, "Design of Particulate Matter Reduction of the Electrostatic Precipitator with Low Pressure for 300 kW Class of Marine Diesel", Journal of Power System Engineering, Vol.25, No.1, pp.60-69, 2021.

- 2) S. W. Kim, K. H. Kim, S. H. Park, T. S. Kim, J. W. Hwang, "Emission Characteristics of a Excavator Equipped with SCR according to Operation Modes", Transactions of KSAE, Vol.26, No.4, pp.496-503, 2018.
- 3) National Air Emission Inventory and Research Center, "2017 National air pollutants emission", pp.19-23, 2020.
- 4) W. S. Kim, S. Y. Baek, T. J. Kim, Y. S. Kim, S. U. Park, C. H. Choi, S. J. Hong, Y. J. Kim, "Work load analysis for determination of the reduction gear ratio for a 78 kW all wheel drive electric tractor design", Korean Journal of Agricultural Science, Vol.46, No.3, pp.613-627, 2019.
- 5) S. Y. Baek, S. M. Baek, H. H. Jeon, J. H. Lee, W. S. 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.
- 6) S. J. Cho, J. G. Kim, J. S. Park, Y. S. Kim, D. K. Lee, "Development of the 80-kW Test Tractor for Load Measurement of Agricultural Operations", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp.46-53, 2022.
- 7) Agricultural Machinery Yearbook in Republic of Korea, "Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative (KAMICO) and Korean Society for Agricultural Machinery (KSAM)", pp.144-145, 2021.
- 8) W. S. Kim, Y. S. Kim, Y. J. Kim, "Development of Prediction Model for Axle Torque of Agricultural Tractors", Transactions of the ASABE, Vol.63, No.6, pp.1773-1786, 2020.
- 9) S. M. Baek, W. S. Kim, J. H. Lee, Y. J. Kim, D. S. Suh, S. O. Chung, C. H. Choi, B. W. Gam, Y. J. Kim, "A study on the emissions of SO_x and NH₃ for a 78 kW class agricultural tractor according to agricultural operations", Korean Journal of Agricultural Science, Vol.47, No.4, pp.1135-1145, 2020.
- 10) J. B. Kim, M. S. Kim, J. H. Kim, Y. I. Lee, S. C. Park, B. H. Oh, J. D. Cha, "Analysis of Emission Characteristics and Estimation of Air Pollutants Emitted from Small Ship", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol.38, No.2, pp.258-268, 2022.
- 11) Y. P. Kim, "Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol.33, No.3, pp.191-204, 2017.
- 12) S. Y. Baek, W. S. Kim, S. M. Baek, H. H. Jeon, S. H. Park, J. S. Kim, C. Yoo, Y. J. Kim, "Analysis of the Engine Load Factor for a 67 kW Agricultural Tractor", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.46, No.3, pp.301-311, 2022.
- 13) T. W. Lee, B. H. Lee, S. H. Cho, J. H. Park, M. D. Eom, J. C. Kim, D. Y. Lee, "On-Road Testing and Calculation of Emission Factor and Fuel Economy", Transaction of KSAE, Vol.17, No.3, pp.90-101, 2009.
- 14) M. D. Eom, J. H. Park, D. S. Baik, "Study of Emission Characteristics of Commercial Vehicles Using PEMS", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.38, No.8, pp.657-663, 2014.
- 15) S. J. Kwon, S. G. Kwon, J. T. Lee, S. I. Oak, Y. H. Seo, S. W. Park, M. S. Chon, "Data Evaluation Methods for Real Driving Emissions using Portable Emissions Measurement System(PEMS)", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.39, No.12, pp.965-973, 2015.
- 16) S. H. Kim, D. W. Lee, "Experimental Research for CO₂ Emission Estimation of Medium-Scale Excavator Reflecting Work Characteristics", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol.37, No.4, pp.717-727, 2017.
- 17) B. S. Kim, W. S. Jang, "A Study on Comparing the CO₂ Emission Estimating Result for Construction Equipment", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol.33, No.4, pp.1675-1682, 2013.
- 18) J. Merkisz, P. Lijewski, P. Fuc, M. Siedlecki, S. Weymann, "The use of the PEMS equipment for the assessment of farm fieldwork energy consumption", Applied Engineering in Agriculture, Vol.31, No.6, pp. 875-879, 2015.
- 19) J. H. Lee, H. H. Jeon, S. Y. Baek, S. M. Baek, W. S. Kim, M. A. A. 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.
- 20) C. S. Shin, T. S. Park, D. H. Hong, T. H. Kim, “Analysis of Air Pollutant Emissions from Agricultural Machinery in South Korea”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.18, No.3, pp.14-25, 2019.
- 21) S. M. Baek, W. S. Kim, S. Y. Baek, H. H. Jeon, D. H. Lee, H. K. Kim, Y. J. Kim, “Analysis of Engine Load Factor for a 78 kW Class Agricultural Tractor According to Agricultural Operations”, Journal of Drive and Control, Vol.19, No.1, pp.16-25, 2022.
- 22) Rural Development Administration (RDA) National Institute of Agricultural Sciences, “2019 Agricultural Machinery Utilization Survey”, 2020.
- 23) National Air Emission Inventory and Research Center, “National air pollutant emissions inventory guidebook (IV)”, pp.208-211, 2020.
- 24) W. S. Kim, Y. J. Kim, S. U. Park, Y. S. Kim, “Influence of soil moisture content on the traction performance of a 78-kW agricultural tractor during plow tillage”, Soil & Tillage Research, Vol.207, 104851, 2021.