

ENGINEERING

A study on the emissions of SO_x and NH₃ for a 78 kW class agricultural tractor according to agricultural operations

Seung Min Baek¹, Wan Soo Kim², Jun Ho Lee¹, Yean Jung Kim³, Dae Seok Suh³, Sun Ok Chung^{1,2}, Chang Hyun Choi⁴, Byoung Woo Gam^{5,*}, Yong Joo Kim^{1,2,*}

¹Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Department of Agroindustry Innovation Research, Korea Rural Economic Institute, Naju 58321, Korea

⁴Department of Bio-Mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

⁵Smart System Research Division, Daedong Industrial Co., Ltd., Seoul 06724, Korea

*Corresponding author: bwgam@daedong.co.kr, babina@cnu.ac.kr

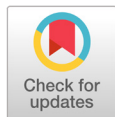
Abstract

The purpose of this study was to compare and analyze the emissions of SO_x and NH₃ for a 78 kW class agricultural tractor during agricultural operations. A real-time monitoring system was constructed for measuring the load data. The field test was conducted during plow and rotary tillage. The working conditions were selected with the transmission gears in M3 Low and M2 High for the plow tillage and L3 High and L3 Low for the rotary tillage. The engine torque and fuel consumption were measured using controller area network (CAN) communication, and the emissions of SO_x and NH₃ were calculated based on the fuel consumption. As a result of the field tests, the engine torque was higher for the plow tillage than for the rotary tillage. As the gear stage was increased, the engine torque became higher. The emissions of SO_x and NH₃ were higher for the plow tillage than for the rotary tillage because the fuel consumption increased. Moreover, the emissions of SO_x and NH₃ tended to be more distributed for the rotary tillage than for the plow tillage. To develop an emission factor for agricultural machinery, it is important to measure reliable emission data during agricultural operations. In a future study, we will collect various emission data using a portable emission measurement system during agricultural operations.

Keywords: agricultural tractor, emission, engine, fuel consumption, torque

Introduction

농업기계는 경운, 정지, 파종, 방제, 수확 등 다양한 농작업을 수행하는 기계를 일컫는다 (Okyerere et al., 2019; Kim et al., 2020). 농업기계는 작업 시 노지에서 발생하는 작업 부하로 인하여 높은 토크를 요구하기 때문에 주로 내연기관을 사용하고 있다(Kim et al., 2018; Lee et



OPEN ACCESS

Citation: Baek SM, Kim WS, Lee JH, Kim YJ, Suh DS, Chung SO, Choi CH, Gam BW, Kim YJ. 2020. 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 47:1135-1145. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20200095>

Received: October 12, 2020

Revised: November 27, 2020

Accepted: November 30, 2020

Copyright: © 2020 Korean Journal of Agricultural Science



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.

al., 2018; Baek et al., 2020). 내연기관으로 작동되는 차량은 크게 도로용(on-road)과 비도로용(off-road)으로 구분되며, 비도로 차량은 자동차 이외의 철도, 항공, 선박과 같은 교통수단과 건설장비 및 농업용 기계 등으로 구분할 수 있다(Kim and Lee, 2014). 비도로용 엔진에서 배출되는 CO₂, CO, NO_x, PM, SO_x, NH₃ 등의 대기 오염물질이 지구 온난화 및 인체 건강에 미치는 영향이 전 세계적인 문제로 대두되면서 이를 줄이려는 노력이 이루어지고 있다(Eom, 2012). 이에 따라 미국 및 유럽 등 선진국에서 시행하고 있는 농업 및 건설기계용 배기규제 Tier 4-Final과 EURO-V의 규제 수준은 강화되고 있으며, 농업 및 건설기계용 Tier 4 배기규제 발효시점을 기준으로 차량용 배기규제와 거의 동등한 수준에 도달하였다(Kwon, 2020). 이와 같이 높은 수준의 배기규제에 대응하기 위해서는 도로용 자동차와 마찬가지로 후처리장치의 적극적인 적용이 반드시 필요하며, 최근 농업기계 분야에서도 배기가스 저감에 관한 연구가 활발히 시행되고 있다(Shin et al., 2019). 농업기계의 배기가스 저감을 위해서는 농작업시 발생하는 배기가스 배출량을 파악하는 것이 중요하다. 또한, 대기 오염물질 배출량을 정확하게 산정하는 것은 국가 고유 배출계수 개발 및 국가 기후변화 대응 및 대기환경 정책을 수립하는 데 있어 기초적인 요소로 활용될 수 있다(Lim et al., 2009). 현재 국내 농업기계의 배기가스 배출량 통계는 IPCC (intergovernmental panel on climate change) guidelines의 기본적인 방법론에 의존하여 산정되고 있다(Choi et al., 2010).

Kim and Lee (2014)은 비도로용 상용차량 및 장비의 배기규제에 따른 세계 및 국내 주요 국내 건설기계 업체의 대응 기술 현황에 대하여 분석하였다. 엔진의 연소기술 강화, 후처리장치 성능 개선과 같은 대응 기술 등을 비교하였으며, 향후 배기규제 전망에 대하여 예측하였다. Cho et al. (2011)은 56 kW급 비도로 차량에서의 입자상물질과 질소산화물을 저감하기 위해 매연여과장치와 고압루프 배기가스 재순환시스템(exhaust gas recirculation, EGR)을 분석하였다. 그 결과, 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst, DOC)와 매연포집장치(diesel particulate filter, DPF)는 입자상물질을 감소시키는 것으로 나타났으며, 동시에 낮은 배압으로 5% 이내의 출력손실을 갖는 것을 확인하였다. Lee (2010)은 자동차의 배출가스를 측정하고 다양한 교통환경을 반영할 수 있는 대기 오염물질 배출계수를 산정하였다. 실제 도로상에서 대기 오염물질 배출량을 측정하였으며, 이 측정 결과를 현행 배출계수의 예측 결과와 비교하여 현행 배출계수가 실제 도로상의 자동차 배출량 예측 방법에 대하여 분석하였다. 또한, 실제 도로상의 배출가스 측정 결과를 2차원 배출율 맵(emission rate map) 형태로 정리한 후 배출량을 산정에 이용하였다.

문헌 연구결과, 자동차 및 건설기계 분야에서 배기가스 저감 및 배출계수 산정을 위한 배기가스 측정에 대한 연구는 활발하게 이뤄지고 있다. 반면, 농업기계 분야에서는 미국 EPA (environmental protection agency)에서 제시하고 있는 자료를 바탕으로 국가 배출계수를 산출하였으나 이를 우리나라 농작업 환경과 조건에 맞게 개발하는 것이 필요하다(Choi et al., 2010). 따라서, 본 연구는 농업기계 배기가스 배출계수 개발에 대한 기초 연구로 대표적인 농업기계인 트랙터를 대상으로 농작업에 따른 SO_x와 NH₃의 배출량을 산출하였으며 이를 비교 및 분석하였다.

Materials and Methods

계측용 트랙터

본 연구에서는 농작업에 따른 부하 데이터를 계측하기 위해 78 kW급 트랙터(S07, TYM Co., Ltd., Gongju, Korea)를 이용하였다. 계측용 트랙터의 제원은 Table 1과 같이 기계식 변속기가 탑재되어 있으며, 전·후진 각각 32단의 기어비를 갖는다. 트랙터 엔진(D34P, Doosan Infracore Co., Ltd., Incheon, Korea)은 Tier-4 전자식으로 CAN (controller area network) 통신을 이용하여 엔진 토크 및 연료 소모량을 데이터 수집 장치로 전송하였으며, 트랙터 내부에는 실시간으로 데이터를 확인 및 저장할 수 있도록 실시간 모니터링 시스템을 구축하였다.

Table 1. Specifications of load measurement tractor used in this study.

Items		Specifications
Length (mm) × width (mm) × height (mm)		4,225 × 2,140 × 2,830
Weight (kg)		3,985
Engine	Rated power (kW)	78@ 2,300 rpm
Transmission	Forward/reverse	32/32
Tire	Front	13.6-24 8PR
	Rear	18.4-34 10PR

필드 테스트

필드 테스트는 충청남도 서산시 운산면 소중리 20에 위치한 논에서 수행하였으며, 필드 크기는 4,000 m² (100 m × 40 m)이다. 농작업 부하는 필드 토양의 특성에 따라 다르게 발생하기 때문에, 선행 연구를 참고하여 필드의 원추 관입지수, 수분 함량, 토성을 분석하였다(Okyere et al., 2018; Lim et al., 2019). 원추 관입지수는 Soil compaction meter (SC900, Spectrum Technology, Texas, USA)를 이용하였으며, 0 - 20 cm 깊이에서 5 cm 간격으로 5회 반복 측정값의 평균으로 계산하였다. 수분 함량은 Soil moisture meter (TDR 350, Spectrum Technology, Texas, USA)를 이용하여 임의의 30곳을 선정하여 반복 측정값의 평균으로 계산하였다. 토성 분석은 시험지의 임의의 10 곳을 대상으로 시료를 채취하여 미농무성(USDA)법에 따라 분석하였다. 토양 분석 결과, 원추 관입지수의 평균값은 738 kPa, 수분 함량의 평균값은 33.8%, 토성은 양질 사토(loamy sand)로 나타났다.

본 연구는 Fig. 1과 같이 쟁기 및 로타리 작업을 대상으로 수행하였으며, 작업기는 이랑쟁기(WJSP-8, Woongin Machinery Co., Ltd., Gimje, Korea)와 로타리(E260, Celli Co., Ltd., Forli, Italy)를 이용하였으며, 상세 제원은 Table 2와 같다. 작업 단수는 실수요자 대상의 설문조사 및 선행 연구를 고려하여 Table 3과 같이 작업에 따라 각각 2개씩 선정하였다(Baek et al., 2019; Kim et al., 2019a). 쟁기 작업은 M3 Low 단(7.09 km·h⁻¹)과 M2 High 단(6.01 km·h⁻¹), 로타리 작업은 L3 High 단(2.83 km·h⁻¹)과 L3 Low 단(2.38 km·h⁻¹)에서 각각 수행하였다. 이 때, 엔진 회전속도는 full throttle 조건인 약 2,510 rpm으로 설정하였다. 작업 패턴은 C타입으로 선정하였으며, 전진-선회-전진의 순서로 작업을 수행하였다(Kim et al., 2019b). 작업 시 경심은 약 15 - 20 cm로 설정하였으며, 작업 부하에 따라 제어가 가능하도록 설정하였다.



(a)

(b)

Fig. 1. Photo of field test according agricultural operations: (a) Plow tillage, (b) rotary tillage.

Table 2. Specifications of attached implements used in this study.

Items	Specifications	
	Plow	Rotary
Company	Woongin Co., Ltd.	Celli Co., Ltd.
Model	WJSP-8	E260
Length (mm) × width (mm) × height (mm)	2,800 × 2,150 × 1,250	860 × 2,760 × 700
Working width (cm)	280	258
Weight (kg)	790	715

Table 3. Working conditions of field test used in this study.

Working type	Gear stage	PTO speed	Engine speed
Plow tillage	M3 Low (7.09 km·h ⁻¹)	-	2,510 rpm
	M2 High (6.01 km·h ⁻¹)		
Rotary tillage	L3 High (2.83 km·h ⁻¹)	PTO 1 (540 rpm)	2,510 rpm
	L3 Low (2.38 km·h ⁻¹)		

PTO, power take off.

배기가스 배출량 산출

배기가스 배출량 계산은 농작업에 따른 계측된 연료 소모량을 이용하였으며, SO_x 배출량에 대한 계산식은 식(1)과 같다. 이 때, 경유의 비중은 0.825 kg·m⁻³을 이용하였으며, 연료 중 황함량은 0.1%, 황함량을 황산화물로 전환하기 위한 계수는 0.02로 계산하였다(NIER, 2013). NH₃ 배출량에 대한 계산식은 식(2)와 같으며, 미국 EPA에서 제시한 트랙터 계수 0.11 값을 이용하였다(U.S. EPA, 1994). 계측된 엔진 토크, 연료 소모량, 배기가스 배출량은 농작업 및 작업 단수에 따라 IBM SPSS Statistics (Ver. 26, IBM, Armonk, USA) 프로그램을 이용하여 t-test를 실시하였다. 또한, 작업 구간에서 배기가스 배출량의 분포특성을 box plot으로 나타냈으며, 이를 비교 및 분석하였다.

$$E_{SO_x} = FC \times SG \times SC \times CF \tag{1}$$

Where, E_{SO_x} = Emission of SO_x (g·h⁻¹)

FC = Fuel consumption (L·h⁻¹)

SG = Fuel specific gravity (kg·m⁻³)

SC = Sulphur content in fuel (%)

CF = Conversion factor from sulfur content into sulfur oxide

$$E_{NH_3} = FC \times EF \tag{2}$$

Where, E_{NH_3} = Emission of NH₃ (g·h⁻¹)

EF = US EPA factor (kg·kL⁻¹)

Results and Discussion

엔진 토크

필드 테스트 결과, 농작업에 따른 작업 단수별 엔진 토크는 Fig. 2와 같이 나타났다. 쟁기 작업 시 엔진 토크는 M3 Low 단 작업 구간에서 234 - 353 Nm의 범위로 나타났으며, M2 High 단에서 157 - 326 Nm 범위로 나타났다. 엔진 정격 토크가 324 Nm인 것을 고려할 때, M3 Low 단에서 정격 토크 대비 약 72 - 109%, M2 High 단에서 약 48 - 101%의 토크를 사용한 것으로 나타났다. 로타리 작업의 경우 엔진 토크는 L3 High 단 작업 구간에서 77 - 326 Nm의 범위로 나타났으며, L3 Low 단에서 102 - 285 Nm 범위로 나타났다. L3 High 단에서 엔진 토크는 정격 토크 대비 약 24 - 101%, L3 Low 단에서 약 31 - 88%의 토크를 사용한 것으로 나타났다. 농작업 시 엔진 토크의 평균 및 표준편차는 각각 Table 4, Table 5와 같이 나타났다. 엔진 토크 평균값은 쟁기 작업에서 로타리 작업보다 높게 나타났으며, 작업 단수가 높을 수록 엔진 토크가 높게 나타나는 것을 확인하였다.

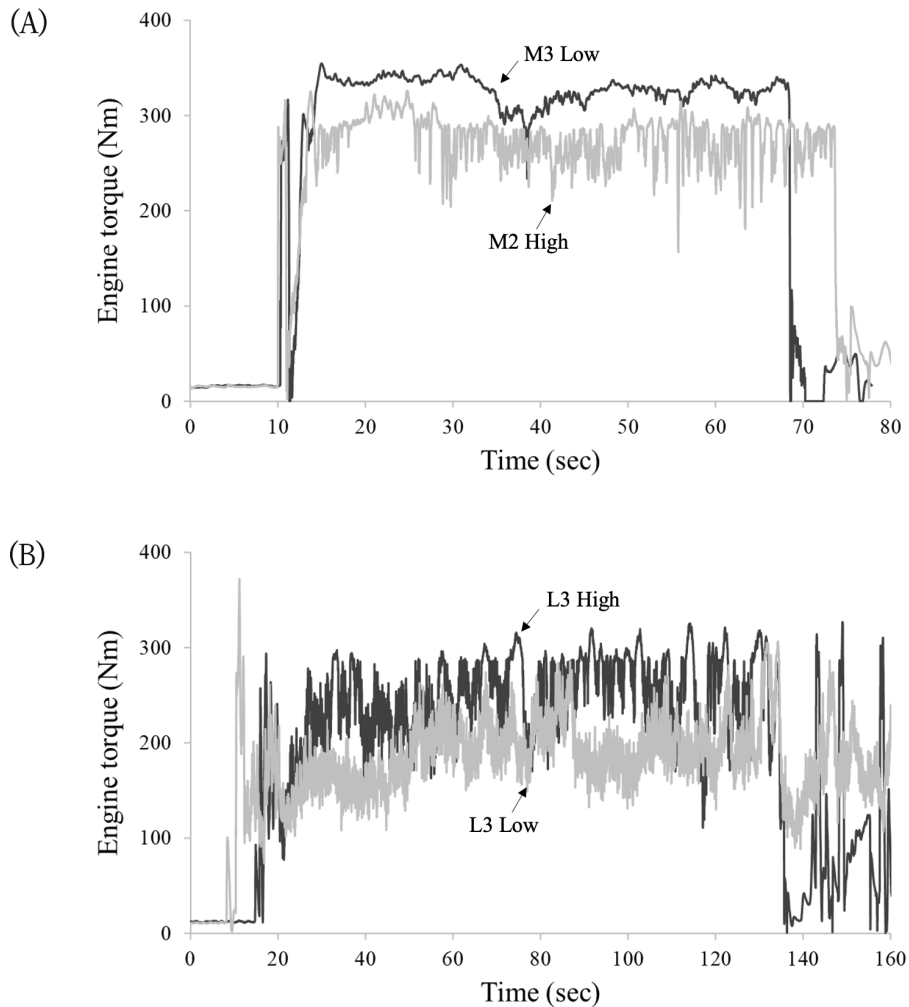


Fig. 2. Results of engine torque for 78 kW class agricultural tractor according agricultural operations: (a) Plow tillage, (b) rotary tillage.

연료 소모량

Fig. 3은 농작업에 따른 작업 단수별 연료 소모량을 나타낸다. 농작업 시 연료 소모량은 쟁기 및 로타리 작업에서 모두 엔진 토크와 유사한 개형으로 나타났으며, 작업 단수가 높을수록 연료 소모량이 높게 나타났다. 이는 작업 속도가 빠를수록 높은 작업 부하가 발생하고, 이에 따라 엔진에서 보다 높은 토크를 요구하기 때문에 연료 소모량이 증가하는 것으로 판단된다. 농작업 시 연료 소모량의 평균 및 표준편차는 각각 Table 4, Table 5 같이 나타났다. 쟁기 작업 시 연료 소모량의 평균값은 M3 Low 단계에서 15.3 L·h⁻¹, M2 High 단계에서 14.5 L·h⁻¹로 나타났으며, 로타리 작업의 경우 L3 High 단계에서 13.1 L·h⁻¹, L3 Low 단계에서 12.1 L·h⁻¹로 나타났다.

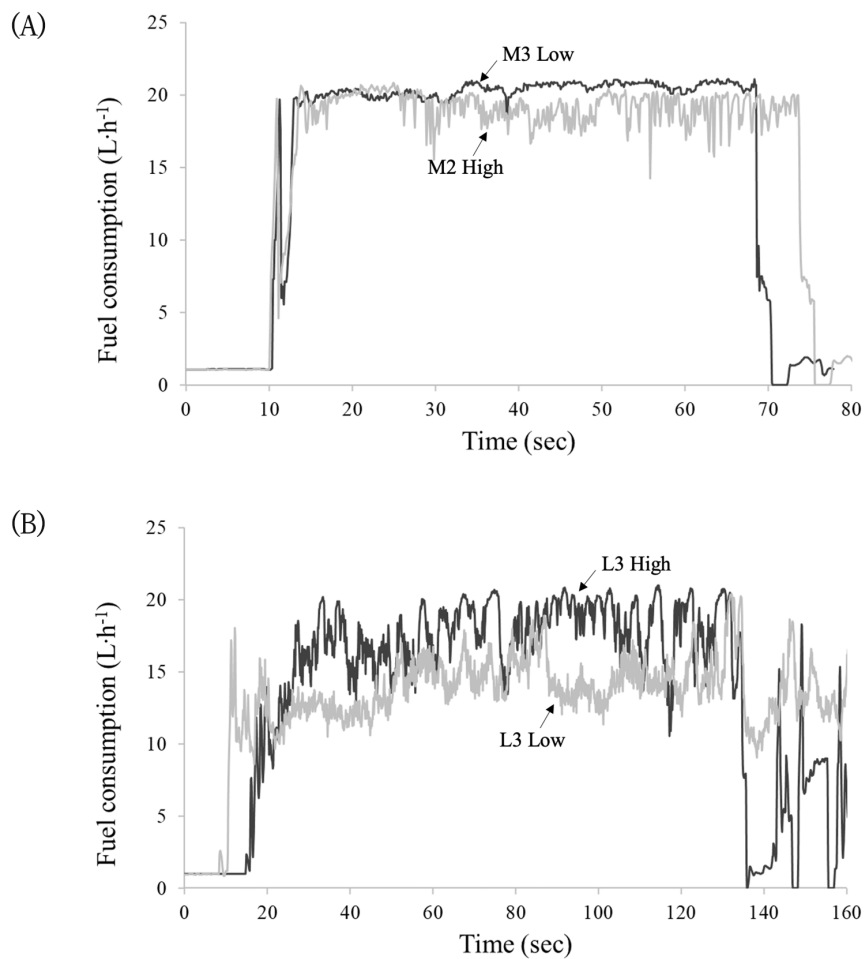


Fig. 3. Results of fuel consumption for 78 kW class agricultural tractor according agricultural operations: (a) Plow tillage, (b) rotary tillage.

Table 4. Results of engine torque, fuel consumption and emission during plow tillage.

Gear stage	Engine torque (Nm)	Fuel consumption (L·h ⁻¹)	Emission (g·h ⁻¹)	
			SO _x	NH ₃
M3 Low	244.7 ± 134.7 ^a	15.3 ± 8.2 ^a	0.252 ± 0.136 ^a	1.686 ± 0.907 ^a
M2 High	211.1 ± 110.0 ^b	14.5 ± 7.6 ^b	0.240 ± 0.127 ^b	1.601 ± 0.846 ^b

^z Average ± standard deviation.

a, b: Means in a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

Table 5. Results of engine torque, fuel consumption and emission during rotary tillage.

Gear stage	Engine torque (Nm)	Fuel consumption (L·h ⁻¹)	Emission (g·h ⁻¹)	
			SO _x	NH ₃
L3 High	185.6 ± 102.1 ^z a	13.1 ± 7.0a	0.217 ± 0.115a	1.448 ± 0.771a
L3 Low	161.3 ± 67.7b	12.1 ± 4.6b	0.200 ± 0.077b	1.333 ± 0.514b

^z Average ± standard deviation.

a, b: Means in a column with different letters are significantly different (p < 0.05).

배기가스 배출량

Fig. 4, Fig. 5는 농작업에 따른 작업 단수별 배기가스 배출량을 나타낸다. SO_x의 배출량은 쟁기 작업 시 M3 Low 단 작업 구간에서 0.097 - 0.348 g·h⁻¹의 범위로 나타났으며, M2 High 단에서 0.235 - 0.344 g·h⁻¹ 범위로 나타났다. 로타리 작업의 경우 L3 High 단 작업 구간에서 0.137 - 0.347 g·h⁻¹의 범위로 나타났으며, L3 Low 단에서 0.159 - 0.312 g·h⁻¹ 범위로 나타났다. NH₃의 배출량은 쟁기 작업 시 M3 Low 단 작업 구간에서 0.644 - 2.321 g·h⁻¹의 범위로 나타났으며, M2 High 단은 1.568 - 2.294 g·h⁻¹ 범위로 나타났다. 로타리 작업의 경우 L3 High 단 작업 구간에서 0.913 - 2.310 g·h⁻¹의 범위로 나타났으며, L3 Low 단은 1.062 - 2.079 g·h⁻¹ 범위로 나타났다. SO_x 및 NH₃ 배출량은 쟁기 작업에서 로타리 작업보다 높게 나타났으며, 이는 연료 소모량이 높게 나타남에 따라 배기가스 배출량도 증가한 것으로 판단된다.

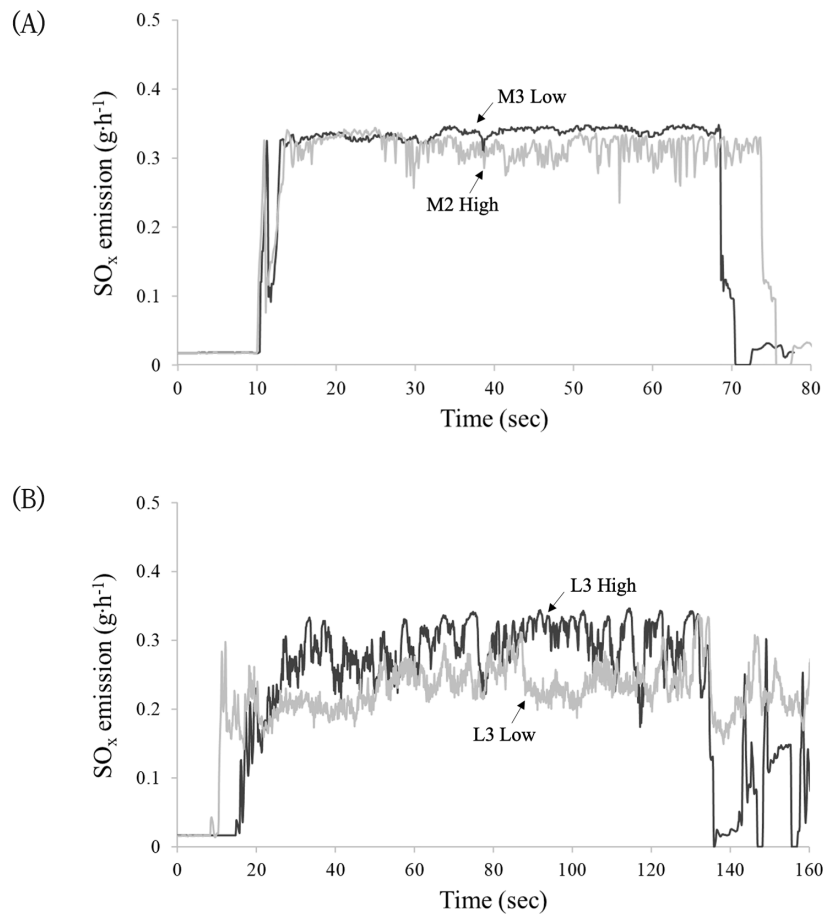


Fig. 4. Results of SO_x emission for 78 kW class agricultural tractor according agricultural operations: (a) Plow tillage, (b) rotary tillage.

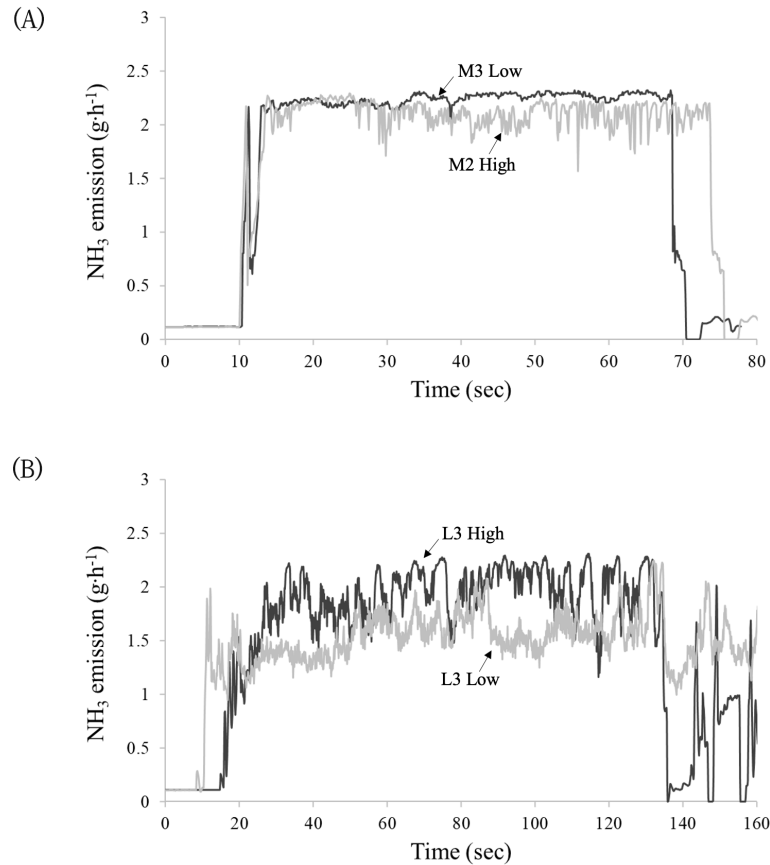


Fig. 5. Results of NH₃ emission for 78 kW class agricultural tractor according agricultural operations: (a) Plow tillage, (b) rotary tillage.

통계 분석

t-test 분석 결과, 농작업에 따른 작업 단수별 엔진 토크, 연료 소모량, 배기가스 배출량은 Table 4, Table 5와 같이 유의 수준 $p < 0.05$ 에서 모두 유의한 차이가 나타남을 확인하였다. Fig. 6은 쟁기 및 로타리 작업 구간에 따른 SO_x 및 NH₃ 배출량을 box plot으로 나타낸 것이다. SO_x 및 NH₃ 배출량은 로타리 작업에서 쟁기 작업 보다 더 분산된 경향으로 나타났다. 이는 로타리 작업에서 쟁기 작업보다 더 큰 변동 부하가 발생함에 따라 연료 소모량 값의 변동 폭도 넓어졌기 때문인 것으로 판단된다. 쟁기 작업 시 배기가스 배출량은 모두 M2 High 단에서 M3 Low 단보다 분포 경향에 넓게 나타났으며, 두 작업 단수에서 모두 SO_x 및 NH₃ 배출량은 각각의 평균값 이하에 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다. 로타리 작업의 경우 배기가스 배출량은 모두 L3 High 단에서 L3 Low 단보다 분포 경향이 넓게 나타났다. 또한, SO_x 및 NH₃ 배출량은 L3 High 단에서 평균값 이하에 상대적으로 많이 분포하였으며, L3 Low 단에서는 대칭적으로 분포하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 농작업에 따른 작업 단수별 엔진 토크와 배기가스 배출량의 상관 관계를 나타낸다. 엔진 토크와 배기가스 배출량은 모두 쟁기 작업에서 로타리 작업보다 높게 나타났으며, 작업 속도가 빠를수록 높게 나타났다. 이는 엔진 토크가 높게 발생할수록 연료 소모량이 증가하면서 배기가스 배출량이 증가하는 것으로 판단된다. 쟁기 및 로타리 작업에 따른 엔진 토크 및 배기가스 배출량은 M3 Low > M2 High > L3 High > L3 Low 순으로 나타났다. 쟁기 작업 시 M3 Low 단은 M2 High 단 보다 엔진 토크가 15.9% 높게 나타났으며, SO_x 및 NH₃ 배출량은 각각 5.0, 5.3% 높게 나타났다. 로타리 작업의 경우 L3 High 단은 L3 Low 단보다 엔진 토크가 7.5% 높게 나타났으며, SO_x 및 NH₃ 배출량은 각각 4.9, 5.0% 높게 나타났다. 쟁기 작업에서의 작업 단수 간 엔진 토크 차이는 약 15%로 로타리 작업보다 크게 나타났으나, 배기가스 배출량의 차이는 약 5%로 서로 유사하게 나타났다.

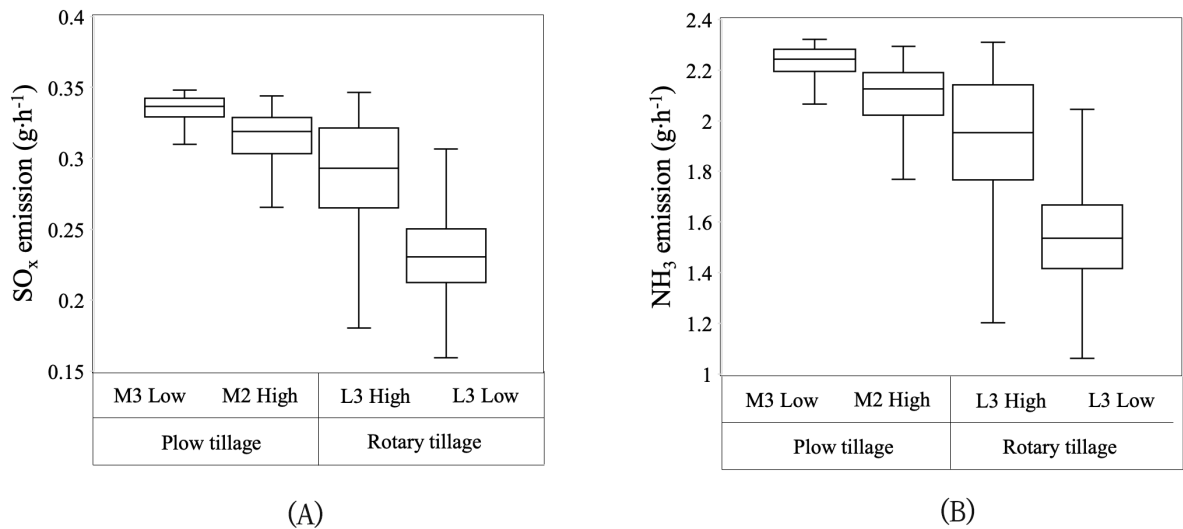


Fig. 6. Variation of emission for 78 kW class agricultural tractor according to agricultural operations using box plot: (a) SO_x, (b) NH₃.

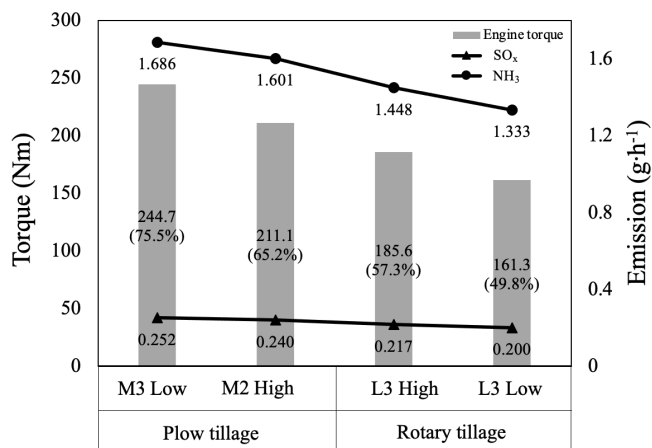


Fig. 7. Comparison of the relationship between engine torque and emission according to agricultural operations.

Conclusion

본 연구는 농업용 트랙터의 농작업에 따른 배기가스 배출량 산출을 위한 기초 연구로서 78 kW급 트랙터 실시간 부하 계측 모니터링 시스템을 개발하고 쟁기 및 로타리 작업에 따른 엔진 토크 및 연료 소모량을 측정하였으며, 배기가스 배출량 산출 이론식과 계측한 연료 소모량을 이용하여 SO_x와 NH₃ 배출량을 계산하고 비교 및 분석하였다. 필드 테스트 결과, 엔진 토크는 쟁기 작업에서 로타리 작업보다 높게 나타났으며, 작업 속도가 빠를수록 높게 나타났다. SO_x 및 NH₃ 배출량은 연료 소모량이 증가함에 따라 쟁기 작업에서 로타리 작업보다 높게 나타났으며, 로타리 작업에서 쟁기 작업 보다 더 분산된 경향으로 나타남을 확인하였다. 본 연구는 단순히 트랙터 연료 소모량을 이용하여 배기가스 배출량을 산출하고 이를 비교 및 분석하였으며, 농업기계에 대한 배출량 저감 및 국가 고유 배출 계수 개발을 위해서는 농작업 시 발생하는 다양한 배기가스에 대한 측정 및 신뢰성 있는 데이터 확보가 필요하다. 따라서, 향후 연구에서는 트랙터에 이동형 배기가스 계측 장비(portable emission measurement system, PEMS)을 부착하여 CO₂, CH₄, NO_x, PM 등 보다 많은 배기가스 배출량 데이터에 대한 측정 및 분석을 실시할 예정이다.

Acknowledgements

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ015098022020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Authors Information

Seung Min Baek, <https://orcid.org/0000-0002-4627-191X>

Wan Soo Kim, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4761>

Jun Ho Lee, <https://orcid.org/0000-0002-4131-9718>

Yean Jung Kim, Department of Agroindustry Innovation Research, Korea Rural Economic Institute, Research engineer

Dae Seok Suh, Department of Agroindustry Innovation Research, Korea Rural Economic Institute, Researcher

Sun Ok Chung, <https://orcid.org/0000-0001-7629-7224>

Chang Hyun Choi, Department of Bio-Mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Professor

Byoung Woo Gam, Smart System Research Division, Daedong Industrial Co., Ltd, Director

Yong Joo Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1212-9018>

References

- Baek SM, Kim WS, Kim YS, Lee NG, Kim NH, Kim YJ. 2020. Analysis of the load distribution and contact safety factor of PTO gears of a 71 kW class agricultural tractor. *Korean Journal of Agricultural Science* 47:327-335. [in Korean]
- Baek SM, Kim WS, Park SU, Kim YJ. 2019. Analysis of equivalent torque of 78 kW agricultural tractor during rotary tillage. *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology* 12:359-365. [in Korean]
- Cho GB, Kim HS, Kang JH. 2011. A study of the reduction of diesel-engine emissions for off-road vehicles. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B* 35:577-583. [in Korean]
- Choi MA, Kim JL, Lee HJ, Jang YK. 2010. Estimation of greenhouse gas emission from off-road transportation. *Journal of Climate Change Research* 1:211-217. [in Korean]

- Eom MD. 2012. Current legislation status of domestic construction and agricultural equipments in Korea. *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 34:82-84. [in Korean]
- Kim DS, Lee DI. 2014. Emission regulations and technology trends on off-highway vehicles / equipments. *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 36:16-21. [in Korean]
- Kim JG, Kim YJ, Kim JH, Shin BS, Nam JS. 2018. Consumed-power and load characteristics of a tillage operation in an upland field in Republic of Korea. *Journal of Biosystems Engineering* 43:83-93.
- Kim TJ, Kim WS, Kim YS, Chung SO, Park SU, Hong SJ, Choi CH, Kim YJ. 2019a. Strength analysis of mechanical transmission using equivalent torque of plow tillage of an 82 kW-class tractor. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:723-735. [in Korean]
- Kim WS, Kim YS, Kim TJ, Park SU, Choi Y, Kim YK, Kim YK. 2019b. Analysis of power requirement of 78 kW class agricultural tractor according to the major field operation. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A* 43:911-922. [in Korean]
- Kim YH, Kim TJ, Kim YJ. 2020. Development trend of forward-reverse shuttle control technology for agricultural tractor. *Journal of Drive and Control* 17:62-67. [in Korean]
- Kwon SI. 2020. The new standard of domestic construction and agricultural equipments. *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers* 42:24-26. [in Korean]
- Lee BS, Yoo SN, Lee CH, Choi IS, Choi Y, Yun YT. 2018. Prototype development of a three-wheel riding cultivator and its basic performance. *Journal of Biosystems Engineering* 43:285-295.
- Lee TW. 2010. Study on methodology of emission factors development for vehicles based on on-road measurements. Master dissertation, Inha Univ., Incheon, Korean. [in Korean]
- Lim JH, Jung SW, Lee TW, Kim JC, Seo CY, Ryu JH, Hwang JW, Kim SM, Eom DS. 2009. A study on calculation of air pollutants emission factors for construction equipment. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 25:188-195. [in Korean]
- Lim SJ, Kwon HJ, Kang YS, Lee PU, Kim TJ, Kim YJ, Kim YS. 2019. Power analysis of a 3-kW class motor-driven multipurpose walking-type transplanter. *Journal of Biosystems Engineering* 44:135-145.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2013. A study on the calculation of pollutant emission factors for vehicles (V)-calculation of pollutant emission factors for construction equipment-. NIER, Incheon, Korea. [in Korean]
- Okyere FG, Moon BE, Qasim W, Basak JK, Kahn F, Kang DS, Yoon YC, Kim HT. 2018. Tillage operational analysis based on soil moisture content, machine speed, and disc space of compact disc harrow. *Journal of Biosystems Engineering* 43:161-172.
- Okyere FG, Qasim W, Basak JK, Khan F, Lee YJ, Park JH, Arulmozhi E, Yoon YC, Kang DS, Kim HT. 2019. Analysis of draft force requirement of a compact disc harrow and model development for future predictions. *Journal of Biosystems Engineering* 44:47-56.
- Shin CS, Park TS, Hong DH, Kim TH. 2019. Analysis of air pollutant emissions from agricultural machinery in South Korea. *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 18:14-25.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 1994. Development and selection of ammonia emission factors. U.S. EPA, Washington, D.C., USA.