

농업 에너지 부문 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정방법 개선에 관한 연구

박건진*[†] · 이은지** · 김필수*** · 김정*** · 남재작**** · 최상진*****

^{*}(주)이아이랩 연구사업본부장, ^{**}(주)이아이랩 연구원, ^{***}(주)이아이랩 팀장, ^{****}한국정밀농업연구소 연구소장, ^{*****}(주)이아이랩 대표이사

Improving the calculation method of GHG and air pollutant emissions in the agricultural energy sector

Park, Geonjin*[†] · Lee, Eunji** · Kim, Pilsu*** · Kim, Jeong*** · Nam, Jaejak**** and Choi, Sangjin*****

^{*}Head of Research Division, EI LAP INC., Gunpo, Korea

^{**}Researcher, EI LAP INC., Gunpo, Korea

^{***}Team Leader, EI LAP INC., Gunpo, Korea

^{****}Director of Research, Korea Precision Agriculture Research Institute, Suwon, Korea

^{*****}CEO, EI LAP INC., Gunpo, Korea

ABSTRACT

Recently, in addition to existing greenhouse gases (GHG), analysis and evaluation of short-lived climate forcers (SLCF) that affect climate change have become important, and the need for integrated management has emerged to achieve carbon neutrality. However, in the domestic agricultural energy sector, there are differences in the classification systems and activity data applied to the inventory of GHG and air pollutants, making it difficult to link them. In other words, if we consider the correlation between GHG and air pollutants emitted simultaneously when using fuel, a detailed inventory requires the use of the same source classification system and activity data. This study aimed to create an inventory by calculating GHG and air pollutant emissions based on the same activity data from the agricultural energy sector. The classification system was based on agricultural machinery as prescribed by relevant laws and regulations, and the activity data were those of tax-free oil. The inventory created based on the results of this study is expected to be utilized for efficient integrated management of carbon neutrality and air improvement policies in the relatively undervalued agricultural energy sector.

Key words: Agricultural Machinery, GHG Emissions, Air Pollutant Emissions, Co-Emitted Species

1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental panel on climate change, 이하 IPCC)에서는 기후변화에 영향(온실 효과 또는 냉각 효과)을 미치는 주요 대기오염물질인 일산화탄소(CO), 질소화합물(NOx), 비메탄휘발성유기화합물(Non methane volatile organic compounds, 이하 NMVOCs), 이산화황(SO₂)을 간접 온실가스(Precursor gases)로 정의하고(IPCC, 2006), 2015년 유엔

기후변화회의(2015 United nations climate change conference; COP 21)에서는 파리협정을 채택하고, 간접 온실가스 배출량 관련 정보를 제출하도록 권고하였다(UN, 2015). 그리고 61차 IPCC 총회(61st Session of the IPCC)에서는 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 비메탄 휘발성유기화합물(NMVOCs), 이산화황(SO₂), 암모니아(NH₃), 무기탄소(BC) 및 유기탄소(OC), 먼지(PM) 등 7개 단기체류 기후변화 원인물질(Short-Lived Climate Forcers, 이하 SLCF)에 대한 인벤토리 작성 방법론에 대

[†]Corresponding author : hotan@eilap.com (Rm1107-103, SK Ventium, 166, Gosanro, Gunposi, Gyeonggi-do, 15850, Korea. Tel. +82-31-429-7334)

ORCID 박건진 0000-0003-0223-1999
이은지 0009-0001-2099-2962
김필수 0000-0003-0260-5110

김 정 0009-0000-5718-0004
남재작 0000-0002-4409-1982
최상진 0000-0002-5887-6633

한 보고서 개요¹⁾를 승인하였다(IPCC, 2024). 이러한 세계적인 흐름에 따라 국내에서도 간접 온실가스 배출량을 산정하는 등 배출량 통계 산정범위를 확대 추진 중이다(Korean Government, 2020).

즉, 탄소중립을 위해서는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등 지구온난화에 직접적으로 영향을 미치는 온실가스 외에도 간접 온실가스인 단기체류 기후변화 원인물질(SLCF)에 대한 관리와 평가도 매우 중요해지고 있다. 따라서 연료 연소 시 동시에 배출되는 온실가스와 대기오염물질의 연관성을 고려한다면, 배출원 분류체계와 활동자료를 동일하게 적용하여 인벤토리를 작성하고, 활용하여야 온실가스와 대기오염물질 감축 관련 정책의 효율적 추진 및 이행·평가가 가능하다. 일례로 유럽환경청(European Environment Agency, 이하 EEA)에서는 배출량 산정 방법론별로 동일한 배출원 분류체계를 기준으로 동일 활동자료 기반의 온실가스 및 대기오염물질 배출계수를 제시하고 있다(EEA, 2019).

그러나 국내 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정 방법은 배출원 분류체계와 적용하는 활동자료에 차이가 있어 상호 연계하여 분석하거나 통합 관리하기에는 한계가 있다. 현재 연료 연소로 인한 온실가스 배출량은 ‘연도별 에너지통계연보’의 부문별 연료 소비량을 활동자료로 활용하고 있고(Greenhouse gas inventory and research center of korea(이하 GIR), 2024), 대기오염물질 배출량은 배출원별 연료 소비량을 활용하여 산정하는 방법(고정 배출원 대상)과 등록대수, 출력, 가동시간 등을 활동도 자료를 활용하여 산정하는 방법(이동 배출원 대상)을 혼용하고 있다(National Air Emission Inventory and Research Center(이하 NAIR), 2023).

농업 에너지 부문의 배출량 산정도 동일한 상황이다. 특히 온실가스 배출량은 국가 에너지 관련 통계 자료의 한계로 세부 분류체계 없이 농업/임업/어업 부문으로만 분류되어 추정된 연료 소비량을 활용하여 산정²⁾하고 있다. 대기오염물질 배출량은 고정 배출원의 경우 비산업연소

농업·축산·수산업시설로 분류되어 연료별 소비량을 적용하여 배출량을 산정하고, 이동 배출원의 경우 8개의 농업기계만을 대상으로 농업기계별 등록대수와 작업시간³⁾을 활동도 자료를 활용하여 배출량을 산정하고 있어 개선이 필요한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 선행 연구에서 적용한 일부 작물 및 축종을 대상으로 표본 조사하여 산정하는 방법 대신 연료 연소로 온실가스 및 대기오염물질을 배출하는 배출원을 중심으로 분석하고자 관련 법령 등에서 규정하고 있는 농업기계 범위 및 종류를 기준으로 배출원 분류체계를 설정하고, 농업용 면세유 배정 및 공급실적 등을 활동자료로 활용하여 농업기계 운영으로 인한 온실가스 및 대기오염물질 배출량을 산정하였다.

2. 주요 현황 및 선행연구 고찰

2.1. 농업기계 현황

정부에서는 농업의 생산성 향상과 농가 경영 개선을 위하여 관계 법령에 의거, 지속적인 농업기계 개발과 보급 사업을 추진하고 있으며, 현재 농업 부문에서 사용되고 있는 농업기계의 종류는 매우 다양하다. 「농업기계화 촉진법」 제2조1항에 따르면, ‘농업기계’는 농림축산물의 생산, 처리작업, 환경 제어와 자동화 등에 사용되는 기계·설비 및 그 부속 기자재로 광범위하게 정의되어 있다. 「동법 시행규칙」 [별표 1]에서 농업기계를 40종 이상으로 명시⁴⁾하고 있으며, 「농업용 면세유 공급 및 관리규정」 제3조에 따라 면세유 공급대상으로 지정된 농업기계도 42종으로 규정⁵⁾⁶⁾되어 있다.

그러나 Table 1에서 보는 바와 같이 관계 법령에 규정되어 있는 ‘농업기계의 종류’와 비교하여 ‘농업기계 보유 현황 및 이용실태 조사’ 등 관련 통계에서는 몇몇 주요 농업기계만을 조사 대상으로 선정하여 통계 자료가 생산되고 있다. 즉, 농업기계 운영에 따른 배출량 산정 과정에서

- 1) 단기체류 기후변화 원인물질 배출량 산정 시 온실가스 분류체계와 동일한 구성으로 작성될 예정이다.
- 2) 국가 온실가스 인벤토리 보고서에 따르면, 농업/임업 부문의 활동자료는 국가 에너지밸런스의 농림어업 연료 소비량 총량에서 어업의 활동자료를 차감한 자료를 농업/임업 부문 활동자료로 활용하고 있다.
- 3) 농업기계 보유현황(농림축산식품부), 농업기계 이용실태 조사(국립농업과학원) 자료를 활용하고 있다.
- 4) 「농업기계화 촉진법」에 규정된 농업기계의 범위에는 농업용 트랙터 보호구조물, 농산물 저온저장고, 농축산물 생산 환경조절장치 등 화석연료를 사용하지 않는 농업기계가 포함되어 있다.
- 5) 화석연료를 사용하는 농업기계를 대상으로 하며, 농업용 화물자동차(「자동차관리법 시행규칙」 별표 1에 따른 경형·소형 및 최대적재량이 1.2톤 이하인 중형 화물자동차로 한정), 농선, 버섯재배소독기 등 「농업기계화 촉진법」에 규정되지 않은 농업기계가 포함되어 있다.
- 6) 면세유 공급대상으로 지정된 농업기계는 42종이지만, 면세유 배정량 자료에는 ‘동력제조기’에 대한 배정량 정보는 없기 때문에 실제 면세유를 공급받는 농업기계는 41종이다.

Table 1. Types of agricultural machinery

A ^{1), 2)}		B ^{1), 3)}	C ⁴⁾	D ⁵⁾	E ⁶⁾
1	Tractor	○	○	○	○
2	Tractor protective structure				
3	Combine	○	○	○	○
4	Rice transplanter	○	○	○	○
5	Vegetable transplanter	○	○		
6	Agricultural heater	○			
7	Crop dryer	○	○	○	
8	Low-temperature storage				
9	Household rice mill				
10	Crop transport vehicle	○	○		
11	Agricultural loader	○			
12	Agricultural excavator	○			
13	Multipurpose cultivator	○	○	○	
14	Fertilizer applicator	○			
15	Grain dryer	○	○	○	
16	Aerial work platform		○		
17	Spouter	○	○	○	○
18	Shredder	○			
19	Sawdust maker				
20	Crop washer	○			
21	Mower	○			
22	Power weeder	○			
23	Agricultural lift				
24	Trailer				
25	Agricultural baler				
26	Crop binding machine	○			
27	Power cutter	○			
28	Bale wrapper				
29	Harvester	○	○		
30	Tiller	○	○	○	○
31	Heating feed mixers	○			
32	Seeder	○	○		○
33	Feed dispenser				
34	Crop peeler	○			
35	Thresher	○			○
36	Crop sorter				

Table 1. Types of agricultural machinery (Continued)

A ^{1), 2)}		B ^{1), 3)}	C ⁴⁾	D ⁵⁾	E ⁶⁾
37	Auxiliary equipment				
38	Agricultural drone	○	○		
39	Environmental control system				
40	Crop packaging machine				
	Other	Agricultural cargo vehicle, Agricultural ship, Mushroom cultivation sterilizer, Furrow, Soil pulverizer, Soil breaker, Water pump			Water pump

1) Korean Names of agricultural machinery

Tractor(농업용 트랙터), Tractor Protective Structure(농업용 트랙터 보호구조물), Combine(콤바인), Binder(바인더), Rice Transplanter(이앙기), Vegetable Transplanter(정식기), Agricultural Heater(농업용 난방기), Crop Dryer(농산물건조기), Low-Temperature Storage(저온저장고), Household Rice Mill(가정용 도정기), Crop Transport Vehicle(농산물 운반대 및 운반차), Agricultural Loader(농업용 로더), Agricultural Excavator(농업용 굴삭기), Multipurpose Cultivator(관리기), Fertilizer Applicator(비료살포기), Grain Dryer(곡물건조기), Aerial Work Platform(농업용 고소작업차), Spouter(농업용 방제기), Power Sprayer(고속분무기), Speed Sprayer(주행형 동력분무기), Shredder(농업용 파쇄기), Pruner and Shredder(동력가지절단기 및 파쇄기), Sawdust Maker(농업용 톱밥 제조기), Crop Washer(농산물 세척기), Mower(예취기), Windrow Reaper(예도형 예취기), Power Weeder(동력제초기), Cultivator(동력중경제초기), Lawn Mower(잔디깎는 기계), Agricultural Lift(농업용 리프트), Trailer(트레일러), Agricultural Baler(농업용 베일러), Crop Binding Machine(농산물 결속기), Power Cutter(동력절단기), Bale Wrapper(베일포복기), Harvester(동력수확기), Tea Leaf Harvester(녹차채엽기), Tiller(경운기), Heating Feed Mixers(사료배합기), Seeder(동력파종기), Feed Dispenser(사료공급기), Crop Peeler(농산물제피기), Bark Stripper(동력수피기 및 파쇄기), Dehusker and Peeler(동력탈피기 및 박피기), Thresher(탈곡기), Self-Propelled Thresher(주행형 탈곡기), Crop Sorter(농산물선별기), Auxiliary Equipment (부속작업기), Agricultural Drone(농업용 무인항공기), Environmental Control System(농축산물 생산 환경조절장치), Crop Packaging Machine(농산물포장기), Agricultural Cargo Vehicle(농업용 화물자동차), Agricultural Ship(농선), Mushroom cultivation sterilizer(버섯재배소독기), Furrow(동력배토기), Soil Pulverizer(동력혈굴기), Soil Breaker(동력구절기), Water Pump(농업용 양수기)

- 2) source: MAFRA (Ministry of agriculture, food and rural affairs). Enforcement Regulations of the Agricultural Mechanization Promotion Act [Appendix 1] Scope of agricultural machinery.
- 3) source: MAFRA. Regulations on the supply and management of duty-free oil for agricultural use [Appendix 1] Agricultural machinery subject to duty-free oil supply.
- 4) source: Statistics Korea. 2023. Current status of agricultural machinery.
- 5) source: RDA (Rural development administration). 2022. Survey on the use of agricultural machinery.
- 6) source: NAIR (2023).

현행 통계자료를 활동자료로 적용하여 배출량을 산정할 경우 조사 대상이 아닌 농업기계의 연료 소비량, 작업시간 등이 포함되지 않기 때문에 결국 온실가스 및 대기오염물질 배출량은 낮게 산정될 수 밖에 없다.

2.2. 배출량 현황 및 선행 연구 고찰

2.2.1. 배출량 현황

산업화 과정을 거치면서 농림업 부문이 국가 경제에서

차지하는 비중은 점차 감소하고 있으며, 화석연료 사용으로 인한 온실가스 및 대기오염물질 배출량도 지속적으로 감소하고 있는 것으로 공표되고 있다. 농림업 부문에서 연료 연소로 인한 온실가스 배출량은 2002년 6.70백만톤 CO₂eq.에서 2021년 1.41백만톤 CO₂eq.로 감소하였으며 (GIR, 2024)⁷⁾, 대기오염물질 배출량은 2011년 CO 8.64천톤, NO_x 22.10천톤, VOC 2.09천톤, SO_x 9.07천톤에서 2021년 CO 7.42천톤, NO_x 18.53천톤, VOC 1.83천톤, SO_x 0.41천톤 등으로 감소하였다(NAIR, 2013, 2023)⁸⁾.

7) 에너지 분야 연료연소 기타 농업/임업 부문 배출량이다.

8) 비산업 연소_농업축산수산업시설 부문 배출량과 비도로이동오염원_농업기계 부문 배출량의 합계이다.

그러나 Fig. 1과 같이 연도별 온실가스 배출량과 ‘농업 기계용 면세유 공급실적(MAFRA, 2023)’ 추이와 비교할 경우 '13년까지는 유사한 감소 추세를 나타내고 있으나 '14년부터 면세유 공급실적 대비 온실가스 배출량이 급감한 것으로 분석되었다. 이러한 차이가 발생한 원인은 2008년 금융위기 이후 지속적 국제유가 상승 영향에 따른 농업 에너지 부문의 전기화(Electrification) 추세와 농업용 면세유 제도의 지속적 개편⁹⁾, 농림어업으로 통합하여 조사하는 현행 ‘석유류수급통계’ 조사 방식 등이 복합적으로 작용한 것으로 판단된다.

또한, Table 2와 같이 ‘농업기계용 면세유 공급실적’의 유종은 휘발유, 경유, 등유, 중유, LPG, 윤활유로 구분하여 통계가 생산되고 있으나, 농업경영체 대상 면세유 배정 시 적용되고 있는 유종에는 공급실적 상 유종 외 부생

연료유 1호, 2호가 포함되어 있으며, 대기오염물질 배출량 산정대상 유종은 고정배출원에서는 부생연료유 1호, 2호 등이 누락되어 있고, 이동배출원에서는 경유만을 대상으로 산정되고 있다. 즉, 정부에서 농·어업인의 영농·영어비 부담 경감을 위하여 매년 공급하고 있는 면세유 공급량을 기준으로 본다면, 현행 인벤토리 인벤토리 작성 방법으로 산정되고 있는 온실가스 및 대기오염물질 배출량은 상대적으로 저평가 되고 있음을 알 수 있다.

2.2.2. 온실가스 관련 연구 동향

국가 온실가스 배출량 중 연료 연소로 인한 농업 부문 온실가스 배출량은 적용할 수 있는 활동자료의 한계로 농림업 부문으로 통합하여 기계의 종류, 가동시간 등에 대한 고려 없이 연료 종류별로 고정연소와 이동연소로 구분

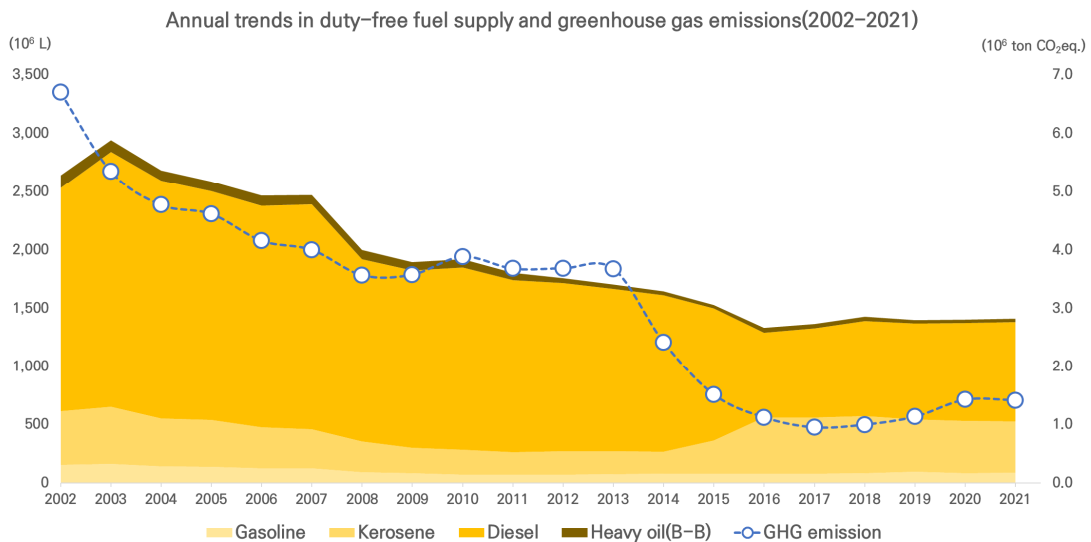


Fig. 1. Trends in duty-free fuel supply and greenhouse gas emissions by year (2002 ~ 2021)

Table 2. Types of fuels for tax-free oil allocation and supply and types of fuels for which emission calculations are applied

Classification		Types of fuels
Types of fuels for tax-free fuel allocation		Gasoline, Kerosene, Diesel, Heavy oil, Gas, By-product fuel oil No.1., By-product fuel oil No.2.
Types of fuels for tax-free fuel supply		Gasoline, Diesel, Kerotene, Heavy oil, LPG
Types of fuels for calculating emissions	fixed sources	Diesel, Kerotene, Heavy oil (B-A, B-B, B-C), LPG, LNG
	mobile sources	Diesel

9) 「농업용 면세유 공급 및 관리규정」은 지속적 개정을 통하여 대상 농업기계를 추가(2012년 농업용 화물자동차, 농업용 굴삭기 등 면세유 공급 대상 추가)하거나 제외하고, 농업용 난방 부문 경유 사용 금지(2015년 7월 이후), ‘기종별·규격별 시간당 연료소모량 조건표’의 개선 등이 이루어지고 있다.

하여 산정하고 있다. 특히, 농업/임업 부문 배출량 산정에 적용하고 있는 활동자료는 국가 에너지밸런스의 농림어업 유종별 소비 총량에서 어업의 활동자료를 차감한 자료를 농업/임업 부문에 적용하고 있다. 따라서, 배출량 산정 결과를 농업 부문 온실가스 감축 관련 정책 수립 및 이행 평가에 활용하기에는 한계가 있어 최근 상향식 방법론을 적용하여 배출량 산정 방법을 개선하고자 관련 연구가 일부 진행되었다.

Kim et al. (2018)은 통계청, 농촌진흥청, 에너지경제연구원에서 특정 작목을 대상으로 표본 조사한 통계 자료¹⁰⁾를 활용하여 농업 분야 에너지의 소비처(농작업 기계, 노지 및 시설원에 기계, 축산 기계, 저장·유통관련 기계 등)와 에너지원(연탄, 전기, 경유, 등유, 가스 등)을 세분화하여 에너지 소비량 및 이산화탄소 배출량을 산정하였다. Cheu et al. (2019)는 농업부문의 이동연소와 관련하여, Table 3과 같이 「2006 IPCC 가이드라인」에서도 디젤 농업기계, 휘발유 4행정(4-stroke) 농업기계, 휘발유 2행정(2-stroke) 농업기계 등 세 가지 분류로 구분하여 기본 배출계수를 제시하고 있어 국내에서도 농업기계에 대한 세분화된 온실가스 배출량 산정이 필요하다고 하였다.

다만, 연료 연소에 의한 농림업 에너지 부문 온실가스 배출량은 국가 에너지 분야 배출량 중 '11년 1.04%에서 '21년 0.67%으로 배출비중이 매우 낮고, 지속적으로 감소하고 있어 추가 연구 진행은 거의 없으며, Kim et al. (2020, 2021), Kim and Lee (2022)와 같이 일부 농업기계를 대상으로 한 운행 조건에 따른 배출량 분석 연구 등이 진행되고 있다.

2.2.3. 대기오염물질 관련 연구 동향

국가 대기오염물질 배출원 분류체계에서 농업기계는 소분류 수준에서 경운기, 콤팩트, 분무기류, 양수기, 탈곡기, 파종기, 트랙터, 이앙기 총 8개로 구분하여 배출량을 산정하고 있다(NAIR, 2023). 그러나 현재 농업의 생산성 향상과 농가 경영 개선을 위한 '농업기계화 촉진법'에 의거, 상기 8종 외 다양한 농업기계의 개발과 보급이 이루어지고 있으나 배출량 산정에 필요한 농업기계 등록현황¹¹⁾ 및 농업기계별 평균 출력, 작업시간 등 활동자료의 한계와 농업기계별 적용할 수 있는 배출계수의 부재로 현행 배출량 산정 방법 개선은 필요하다.

Shin et al. (2019)은 국가 대기오염물질 배출량 자료를 활용하여 농업기계 배출원별, 물질별로 연도별 배출 추이 등을 분석하였으며, 최근 강화되고 있는 배출 규제에 대응할 필요성이 있다고 하였다. Han et al. (2020), Kim and Kim (2022), Lee and Kim (2023) 등은 일부 농업기계를 대상으로 대기오염물질 배출량 분석과 배출계수, 엔진 부하율 등에 대하여 연구를 추진하였다. 또한, Kim (2022, 2023)에서는 농업기계 등의 분류체계 개선과 작업조건 시험모드 개발 및 트랙터, 콤팩트, 관리기 등 농업기계 3종에 대한 엔진 부하율 분석 관련 연구를 통해 비도로이동 오염원 중 농업기계 및 건설기계에 대한 배출량 산정방법 개선을 시도하였다.

Table 3. Default emission factors for Agriculture machinery

Type	CO ₂			CH ₄			N ₂ O		
	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper	Default (kg/TJ)	Lower	Upper
Diesel	74,100	72,600	74,800	4.15	1.67	10.4	28.6	14.3	85.8
Motor Gasoline 4-Stroke	69,300	67,500	73,000	80	32	200	2	1	6
Motor Gasoline 2-Stroke	69,300	67,500	73,000	140	56	350	0.4	0.2	1.2

Source: IPCC. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

10) Kim et al. (2018) 연구에서 활용한 통계자료는 쌀, 콩, 고추, 마늘, 양파 등 5개 작목(표본 수 2,160개)과 번식우, 비육우, 육우, 젖소, 비육돈, 산란계, 육계 등 7개 축종(표본 수 1,400개)을 대상으로 한 통계청 '농가경제조사' 자료와 통계청 조사 작목 외 감자, 배추, 사과, 장미 등 약 120여개 작목(표본 수 4,243개)을 대상으로 한 농촌진흥청 '농업총조사' 자료, 농가, 축산, 농림사업체 등을 대상으로 조사한 에너지경제연구원 '에너지총조사' 자료를 활용하였다.

11) 최근 '농업기계 보유현황' 통계에는 '19년 4종(파종기, 정식기, 수확기, 농업용 멀티콥터) 및 '22년 4종(친환경 동력원 농업기계)이 추가되어 총 16종의 농업기계 보유 현황 자료가 생산되고 있다.

3. 연구방법

3.1. 배출원 분류체계의 개선

앞서 기술한 바와 같이 「농업기계화 촉진법」에 명시된

농업기계 40종에는 무동력 농업기계와 전기를 에너지원으로 하는 농업기계 등이 포함되어 있으며, 면세유를 공급하는 농업기계 범위에는 법에 명시되지 않은 농업기계가 포함되어 있다. 이에 본 연구에서는 면세유 지급 대상 농업기계 종류를 농업기계 세부 배출원 분류체계로 적용

Table 4. Harmonization of source classification system of greenhouse gas and air pollutant emissions from agricultural machinery

Agricultural machinery	Greenhouse gas source classification	Air pollutant source classification
Tiller Tractor	1.A.4.c. Fuel combustion/ Other sector/ Agriculture/forestry/fishing	Non-road transport/ Agricultural machinery (reflected)
Power sprayer Speed sprayer		
Combine Rice transplanter		
Seeder Water pump		
Thresher Self-propelled thresher		
Reaper binder Crop binding machine		
Cultivator Multipurpose cultivator		Non-road transport/ Agricultural machinery (Not reflected)
Mower Lawn mower		
Weeder Windrow reaper		
Harvester Vegetable transplanter		
Power cutter Pruner and shredder		
Bark stripper Dehusker and peeler		
Spouter Crop transport vehicle		
Furrow Fertilizer applicator		
Soil pulverizer Soil breaker		
Crop washer Tea leaf harvester		
Crop dryer Grain dryer		Non-industry combustion/ Agriculture, livestock, and fisheries facilities
Agricultural heater		
Mushroom cultivation sterilizer		
Heating feed mixers	1.A.3.b. Transport/ Road transportation	Road transport/ Cargo vehicle
Agricultural cargo vehicle		
Agricultural loader	1.A.2.f. Manufacturing industries and construction/ other/ Manufacturing	Non-road transport/ Construction equipment
Agricultural excavator		
Agricultural drone	1.A.4.c. Fuel combustion/ Other sector/ Agriculture/forestry/fishing	Non-road transport/ Agricultural machinery (Not reflected)
Agricultural ship	1.A.4.c. Fuel combustion/ Other sector/ Agriculture/forestry/fishing	

하였다. 특히, 면세유 지급 대상 농업기계에는 인벤토리 상 타 배출원 분류체계에 반영되어야 할 농업용 화물자동차, 굴삭기, 로더 등이 포함되어 있기 때문에 면세유를 공급하는 각 농업기계와 국가 온실가스 및 대기오염물질 배출량 분류체계와의 연계 기준을 Table 4와 같이 설정하였다. 또한, 대기오염물질 배출원 분류체계의 경우 현행 배출량 산정 대상 농업기계와 누락된 농업기계로 구분하여 분류하였다.

3.2. 활동자료

배출량 산정에 필요한 활동자료는 ‘농업기계용 면세유 공급실적 및 배정량’ 자료를 활용하였다. 면세유 공급실적은 ‘농림축산식품 주요통계(MAFRA, 2023)’로 매년 생산, 제공되고 있으며, 면세유 배정량 자료는 정보공개 청구를 통하여 Table 5와 같은 내용으로 구성된 2021년 지역별 유종별 농업기계별 면세유 배정량 자료를 수집하였다.

면세유 배정량 자료는 「농어업 경영체 육성 및 지원에 관한 법률」제4조에 따라 등록된 영농 규모 및 재배 품목, 농업기계 등을 고려하고, 「농업용 면세유 공급 및 관리규정」에 규정된 농업기계 기종별·규격별·유종별 단위시

간당 소요량과 연간 사용시간을 적용하여 당해연도 유종별·농업기계별 연간 배정량을 산출하여 배정된다. 그러나 당해 연도 재배 또는 사육 환경의 변화(기온변화 및 강수량 변화, 병해충 또는 전염병 발생 등), 재배 품목 변경, 자연 재해 피해 등으로 실제 공급량과 배정량에는 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 면세유 공급실적 자료를 유종별 소비 총량으로 설정하고, 유종별 총량을 당해년도 농업기계별 배정량 정보와 연계, 비례배분하여 농업기계별 배출량 산정에 필요한 연료 소비량 자료로 활용하였다. 또한, 대기오염물질 산정 시 필요한 농업기계별 기술(배출허용기준) 적용 자료는 ‘연도별 농업기계 공급현황’ 자료(Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative (이하 KAMICO), 2022)와 연도별 국내 제작자 배출허용기준을 활용하여 적용하였으며, 공급 현황 자료가 없는 농업기계는 ‘기타’ 항목의 연도별 공급현황 자료를 기준으로 구분하여 적용하였다.

3.3. 배출계수

온실가스 배출량 산정에 적용한 배출계수는 Table 6과

Table 5. Allocation of duty-free fuel by region, type, and agricultural machinery

Division	Types of data provided
Region	Si-Gun-Gu
Fuel type	Gasoline, Kerosene, Diesel, Heavy oil, Gas, By-product fuel oil No.1., By-product fuel oil No.2.
Agricultural machinery	41 types of agricultural machinery subject to duty-free supply (Cultivator, Weeder => Cultivator)

Table 6. Greenhouse gas conversion factors and emission factors

Fuel type	C·F ¹⁾ (MJ/MJ)	CO ₂ E·F ¹⁾ (ton C/TJ)	CH ₄ E·F ²⁾ (kg CH ₄ /TJ)	N ₂ O E·F ²⁾ (kg N ₂ O/TJ)
Gasoline	0.930	19.547	Stationary - Petroleum: 10 - LPG: 5	Stationary - Petroleum: 0.6 - LPG: 0.1
Kerosene	0.932	19.969		
Diesel	0.931	20.111		
Heavy oil (B-B)	0.938	21.384	Mobile - Petroleum: 5 - LPG: 5	Mobile - Petroleum: 0.6 - LPG: 0.1
LPG (Propane)	0.919	17.641		
By-product fuel oil No.1	0.933	20.067		
By-product fuel oil No.2	0.946	21.641		
GWP		1	28	265

Source: GIR. 2024. 2023 National Greenhouse Gas Inventory Report.

1) National Conversion factors and emission factors applied when calculating emissions after 2017.

2) IPCC default emission factors for CH₄ and N₂O in other sectors.

Table 7. Air pollutant emission factors by stationary source

Category	Fuel	Pollutant Emission Factors ^{1), 2)}						
		CO (kg/kL)	NOx (kg/kL)	TSP (kg/kL)	PM10 (kg/kL)	PM2.5 (kg/kL)	VOC (kg/kL)	NH ₃ (kg/kL)
Stationary engine other fixed equipment	Diesel	0.600	5.460	0.170	0.156	0.072	0.030	0.096
	Kerosene	0.600	2.400	0.170	0.156	0.100	0.030	0.096
	Heavy oil (B-B)	0.600	2.470	1.200	1.100	0.768	0.193	0.096
	LPG	0.228	1.106	0.036	0.036	0.036	0.060	0.013
	By-product fuel oil No.1	0.600	5.460	0.170	0.156	0.072	0.030	0.096
	By-product fuel oil No.2	0.600	2.470	1.200	1.100	0.768	0.193	0.096

Source: NAIR (2023).

1) SO₂ emissions are calculated by applying the sulfur content standards for fuel oil, etc. (Ministry of Environment Notice No. 2015-201). Gasoline: 0.001%, Kerosene: 0.001%, Diesel: 0.1%, Heavy oil (B-B): 0.5%, LPG: 0.004%, By-product fuel oil No.1: 0.1%, By-product fuel oil No.2: 0.2%

2) For by-product fuel oil No. 1, kerosene emission factors were applied.
For by-product fuel oil No. 2, Heavy oil (B-B) emission factors were applied.

Table 8. Air pollutant emission factors by mobile source

Category	Fuel	Tech. ¹⁾	Pollutant Emission Factors ^{2), 3)}							
			CO	NOx	TSP	PM-10	PM-2.5	VOC	NH ₃	BC
Agriculture machinery	Gasoline (2-stroke)	~Stage I	888.77	2.65	5.54	5.54	5.54	328.60	0.00	0.28
		Stage II	994.88	3.57	6.15	6.15	6.15	161.93	0.01	0.31
		Stage III A	994.88	3.57	6.15	6.15	6.15	161.93	0.01	0.31
		Stage IV	994.88	3.57	6.15	6.15	6.15	161.93	0.01	0.31
		Stage V	994.36	3.56	6.12	6.12	6.12	159.48	0.01	0.31
	Gasoline (4-stroke)	~Stage I	1,099.64	10.20	0.22	0.22	0.22	27.31	0.01	0.01
		Stage II	1,150.75	9.55	0.23	0.23	0.23	23.08	0.01	0.01
		Stage III A	1,150.75	9.55	0.23	0.23	0.23	23.08	0.01	0.01
		Stage IV	1,150.75	9.55	0.23	0.23	0.23	23.08	0.01	0.01
		Stage V	1,113.72	7.66	0.23	0.23	0.23	19.02	0.01	0.01
	Diesel	~Stage I	17.15	59.39	2.39	2.39	2.39	5.45	0.01	1.30
		Stage II	7.40	24.98	0.76	0.76	0.76	1.43	0.01	0.59
		Stage III A	7.31	15.66	0.67	0.67	0.67	1.42	0.01	0.50
		Stage IV	7.30	1.92	0.12	0.12	0.12	0.64	0.01	0.09
		Stage V	7.37	2.26	0.07	0.07	0.07	0.64	0.01	0.01
construction machinery	Diesel	~Stage I	19.70	52.79	4.41	4.41	4.41	7.09	0.01	2.43
		Stage II	8.65	26.79	1.25	1.25	1.25	1.92	0.01	1.00
		Stage III A	8.27	18.97	1.15	1.15	1.15	1.78	0.01	0.92
		Stage IV	7.30	1.90	0.12	0.12	0.12	0.65	0.01	0.09
		Stage V	8.91	9.29	0.14	0.14	0.14	1.13	0.01	0.07
LCV	Gasoline	-	217.94	18.92	0.03	0.03	0.03	20.88	0.95	0.02
	Diesel	-	8.97	18.07	1.84	1.84	1.84	1.87	0.05	1.01
	LPG	-	160.90	28.88	0.00	0.00	0.00	25.91	0.15	0.00

1) Classification according to domestic non-road mobile pollution source emission standards (Enforcement Rules of the Air Quality Conservation Act [Appendix 17] Permitted Emission Standards for Manufactured Vehicles)

2) Source: EEA (2019).

3) SO₂ emissions are calculated by applying the sulfur content standards for fuel oil, etc. (Ministry of Environment Notice No. 2015-201). - Gasoline: 0.001%, Kerosene: 0.001%, Diesel: 0.1%, Heavy oil (B-B): 0.5%, LPG: 0.004%, By-product fuel oil No.1: 0.1%, By-product fuel oil No.2: 0.2%

같이 전환계수, CO₂ 배출계수는 국가 온실가스 배출량 산정 체계와 동일하게 국가 고유 배출계수를 적용하였으며, Non-CO₂ 배출계수는 IPCC 기본 배출계수를 적용하였다.

대기오염물질 배출량 산정에 적용한 배출계수는 Table 7과 같이 고정 배출원은 현재 국내 배출량 산정 시 적용하고 있는 유종별 배출계수를 적용하였으며, 배출계수가 없는 부생연료유 1호는 등유 배출계수를, 부생연료유 2호는 중유 배출계수를 적용하였다.¹²⁾

이동 배출원은 국내에서 적용하고 있는 연료 소비량 기준 배출계수가 없으므로 ‘EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019’를 참조, Table 8과 같이 농업기계 및 건설기계는 연료유형별, 기술 유형별로 세분화된 Tier 2 배출계수를 적용하였고¹³⁾, 농업용 화물차는 Light Commercial Vehicles (이하 LCV) Tier 1 배출계수를 적용하였다. 그리고 황산화물 배출량 산정 시에는 국내 연료용 유류 등의 황함유량 기준을 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 농업기계별 유종별 소비량 추정

2021년 면세유 공급실적 자료와 배정량 자료를 비교한 결과 유종별로 차이가 있으나 배정 총량 대비 공급량이 적은 것으로 분석되었다. Table 9와 같이 휘발유는

88.95%, 등유 66.18%, 경유 93.03%, 중유 87.76%, 가스 71.06% 수준으로 분석되었으며, 실제 면세유로 배정되고 있으나 부생연료유 1호, 2호에 대한 공급실적은 누락되어 있는 것으로 분석되었다.

농업기계별 연료 소비량은 면세유 공급실적 자료를 유종별 소비 총량으로 설정하고, 지역별 농업기계별 배정량을 비례배분하여 농업기계별 배출량 산정에 필요한 연료 소비량 자료를 추정하였다. 등유 및 중유와 동일하게 농업용 난방기, 농산물건조기, 버섯재배소독기 등에만 배정되고 있으나 공급실적 통계에는 누락되어 있는 부생연료유 1호, 2호의 경우 지역별 배정 현황이 중유 배정 현황 자료와 유사한 경향을 나타내고 있어 부생연료유 1호, 2호의 연료 소비량은 중유와 동일한 배정량 대비 공급량 비율(%)을 반영하였다. 또한, 농업용 화물차에 배정된 휘발유, 경유 및 LPG 등 면세유의 경우 100% 소비한 것으로 가정하고, 유종별 소비 총량에서 제외한 후 각 농업기계별로 비례배분하였다.

상기 과정을 거쳐 농업기계별 연료 소비량 추정한 결과는 Table 10과 같다. 휘발유는 관리기, 고속분무기, 예취기 등의 농업기계에 많이 소비되고 있으며, 등유는 난방기, 건조기 등의 농업기계에, 경유는 트랙터, 농업용 화물차에서 많이 소비되고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 중유, 부생연료유 1호, 2호와 같이 황함유량¹⁴⁾이 높은 연료가 난방기, 건조기, 버섯재배 소독기와 같은 고정배출원에

Table 9. Allocation and supply of duty-free oil for agricultural machinery in 2021

Fuel Type	Allocation (A) (KL)	Supply (B) (KL)	B/A (%)	Note ¹⁾
Gasoline	97,821	87,015	88.95	
Kerosene	664,499	439,787	66.18 ²⁾	
Diesel	916,337	852,466	93.03	
Heavy oil (B-B)	32,932	28,902	87.76	
LPG (Propane)	19,175	14,053	71.06 ²⁾	
By-product fuel oil No.1	31,335	-	(87.76)	(27,499.4)
By-product fuel oil No.2	9,213	-	(87.76)	(8,094.2)

1) Estimated Supply.

2) Since the main consumers of fuel are heating and drying, there are differences depending on environmental conditions such as temperature and humidity in the year.

- main consumers: Dryer, Heater, Mushroom cultivation sterilizer, etc.

12) 「석유 및 석유대체연료사업법」에 의거, 부생연료유는 보일러(가정용 제외) 또는 노(Furnace)의 연료로서 사용할 수 있으며, 부생연료유 1호는 등유형으로, 2호는 중유형으로 품질기준을 설정. 시험항목에 적용하고 있다.

13) TSP, PM-10, PM-2.5의 배출계수가 동일하여 배출량은 PM-2.5만 산정하였다.

14) 연료용 유류 등의 황함유량(%)은 환경부 고시(제2012-201호)에서 등유 0.001%, 경유 0.1%, 중유 0.5%, 가스 0.004%, 부생연료유 0.1%, 부생연료유 2호 0.2%로 규정되어 있다.

Table 10. Results of estimation of fuel consumption by agricultural machinery in 2021

Agricultural machinery	Fuel type ¹⁾ [KL]						
	A	B	C	D	E	F	G
Tiller	27.0	4.0	76,012.8				
Tractor	2.1		541,958.6				
Power sprayer	954.8	1.5	1,143.4				
Speed sprayer	19,658.8		850.1				
Combine	6.5	0.1	42,251.4				
Rice transplanter	7,636.0	0.1	2,606.0				
Seeder	98.9		3.8				
Water pump	3,260.6	35.3	221.2				
Thresher	4.1		2.1				
Self-propelled thresher	5.0		6.0				
Reaper binder	268.8	0.0	0.5				
Crop binding machine	1.3		53.9				
Cultivator (+Weeder)	1,317.2		0.7				
Multipurpose cultivator	21,500.2	0.2	54.1				
Mower	13,499.6						
Lawn mower	1,856.6		9.9				
Windrow reaper	2,824.5	0.1	1.8				
Harvester	32.0		52.9				
Vegetable transplanter	45.5	0.0	0.2				
Power cutter	16.8	0.1	13.6				
Pruner and shredder	1,308.7		315.8				
Bark stripper	472.6		287.8				
Dehusker and peeler	87.3		1.5				
Sputer	4,323.3						
Crop transport vehicle	5,798.9	0.1	294.3				
Furrow	207.6	0.0	1.2				
Fertilizer applicator	1,358.8	0.1	11.6				
Soil pulverizer	13.1		0.2				
Soil breaker	41.4	0.0	1.4				
Crop washer	32.7	0.1	32.3				
Tea leaf harvester	42.5		6.4				
Crop dryer		52,963.2	1,569.9	56.0	367.0	23.5	3.2
Grain dryer		52,129.5	800.2				
Agricultural heater		334,248.6		28,759.8	10,581.1	27,475.9	8,079.5
Mushroom cultivation sterilizer		395.3	28,378.9	86.3	1,627.7		11.5
Heating feed mixers		8.7	70.7				
Agricultural cargo vehicle	29.9		141,037.8		1,477.3		
Agricultural loader	18.3		13,589.9				
Agricultural excavator	15.7		820.8				
Agricultural drone	126.6		0.0				
Agricultural ship	121.2		2.5				
SUM	87,015.0	439,787.0	852,466.0	28,902.0	14,053.0	27,499.4	8,094.2

1) A: Gasoline, B: Kerosene, C: Diesel, D: Heavy oil (B-B), E: LPG (Propane), F: By-product fuel oil No.1, G: By-product fuel oil No.2

서만 소비되고 있는 것으로 파악되었다.

4.2. 온실가스 배출량

본 연구를 통하여 산정된 농업 에너지 부문의 온실가스 배출량은 2021년 기준 3,725,931.1 ton CO₂eq.으로 분석되었다. 농업기계별 배출량은 트랙터가 1,416,043.9 ton CO₂eq. (38.0%)로 가장 많은 온실가스를 배출하고 있으며, 난방기 1,037,222.9 ton CO₂eq. (27.8%), 화물자동차 370,820.6 ton CO₂eq. (10.0%), 경운기 198,676.6 ton CO₂eq. (5.3%), 농산물건조기 138,009.3 ton CO₂eq. (3.7%), 곡물건조기 133,103.2 ton CO₂eq. (3.6%), 콤바인 110,409.6 ton CO₂eq. (3.0%) 등의 순으로 높은 것으로 분석되었다. 특히, 트랙터, 난방기, 화물자동차, 경운기, 농산물건조기, 곡물건조기, 콤바인, 버섯재배소독기, 관리기, 고속분무기 등 상위 10개 농업기계의 온실가스 배출량이 전체 배출량의 95.0%를 상회하는 것으로 분석되었다.

배출원 형태로 분류하여 보면 난방기, 건조기, 버섯재배소독기 등 고정 배출원에서 1,386,596.2 ton CO₂eq. (37.2%), 트랙터, 농업용 화물차, 경운기, 콤바인 등 이동 배출원에서 2,339,334.9 ton CO₂eq. (62.8%)의 온실가스가 배출되는 것으로 분석되었다. 특히, 이동 배출원은 농업기계(농업 부문), 화물자동차(도로수송 부문), 건설기계(건설업 부문)로 분류가 가능하며, 농업기계는 1,885,602.4 ton CO₂eq. (51.2%), 화물자동차는 370,820.6 ton CO₂eq. (10.1%), 건설기계는 37,727.0 ton CO₂eq. (1.0%)로 분석되었다. 유종별로는 경유가 2,227,491.2 ton CO₂eq. (59.78%)로 가장 많은 온실가스를 배출하고 있으며, 등유 1,105,241.7 ton CO₂eq. (29.66%), 휘발유 190,168.7 ton CO₂eq. (5.10%), 중유 86,733.8 ton CO₂eq. (2.33%), 부생연료유 1호 70,521.6 ton CO₂eq. (1.89%) 등의 순으로 배출량이 높은 것으로 분석되었다.

본 연구 결과 산정된 농림업 에너지 부문 온실가스 배출량¹⁵⁾은 3.74 백만톤 CO₂eq.으로 국가 온실가스 인벤토

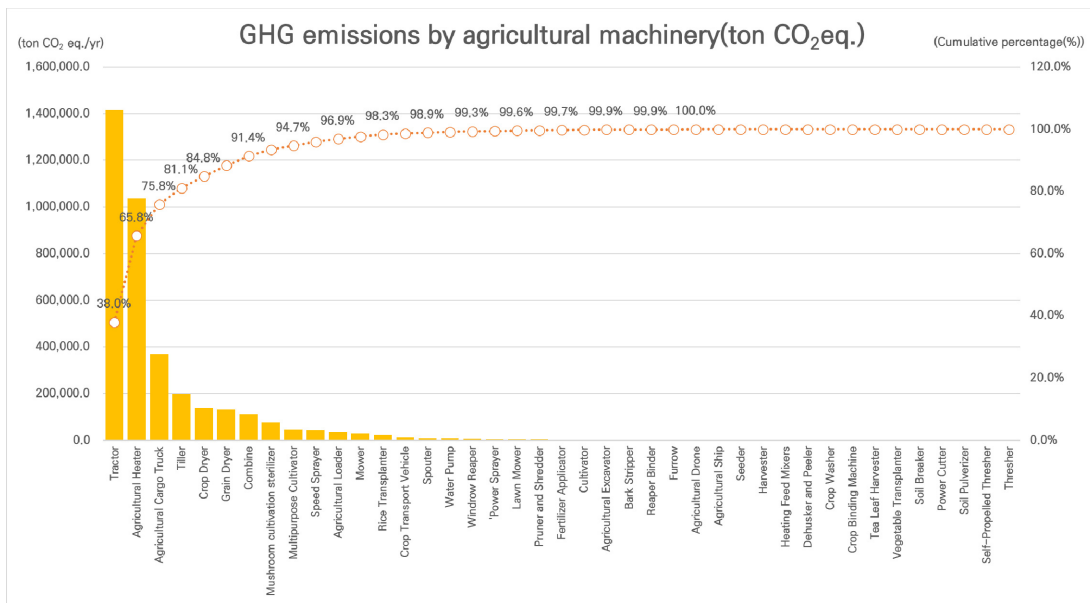


Fig. 2. GHG emissions by agricultural machinery (ton CO₂eq./yr)

15) 농업 부문 면세유 공급실적과 임업 부문 면세유 공급실적 자료를 활용하여 온실가스 배출량을 산정, 합계한 배출량이다. 임업 부문에서도 임업용동력기계톱(Forestry power saw), 임업용동력천공기(Forest tree drill), 임업용원치(Forestry winch), 임업용동력집재기(Cable yarder), 목재파쇄기(Wood chipper), 톱밥제조기(Sawdust maker), 자동지타기(Automated spiraling chainsaw machine), 동력상하차기(Wood grab excavator), 동력임내차(Grapple truck), 타워야더(Tower yarder) 등 10종의 임업기계를 대상으로 면세유를 공급하고 있다. '21년 임업 부문에서는 휘발유 6,984.3 kL, 경유 408.5 kL를 면세유로 공급(산림청 자료)하였으며, 본 연구 방법을 적용하여 산정한 온실가스 배출량은 16,473.4 ton CO₂eq.으로 분석되었다.

Table 11. Greenhouse gas emissions by agricultural machinery in 2021

Agricultural machinery	Source classification	Emission (ton/yr)			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq.
Tiller	Agri_Mobile	197,874.3	13.4	1.6	198,676.6
Tractor	Agri_Mobile	1,410,325.3	95.6	11.5	1,416,043.9
Power sprayer	Agri_Mobile	5,057.1	0.3	0.0	5,077.8
Speed sprayer	Agri_Mobile	44,997.5	3.1	0.4	45,184.9
Combine	Agri_Mobile	109,963.7	7.5	0.9	110,409.6
Rice transplanter	Agri_Mobile	23,400.5	1.6	0.2	23,497.3
Seeder	Agri_Mobile	225.2	0.0	0.0	226.2
Water pump	Agri_Mobile	7,760.2	0.5	0.1	7,792.5
Thresher	Agri_Mobile	14.3	0.0	0.0	14.4
Self-propelled thresher	Agri_Mobile	26.5	0.0	0.0	26.6
Reaper binder	Agri_Mobile	586.4	0.0	0.0	588.8
Crop binding machine	Agri_Mobile	142.9	0.0	0.0	143.5
Cultivator (+Weeder)	Agri_Mobile	2,868.5	0.2	0.0	2,880.4
Multipurpose cultivator	Agri_Mobile	46,934.2	3.3	0.4	47,130.0
Mower	Agri_Mobile	29,380.3	2.0	0.2	29,502.9
Lawn mower	Agri_Mobile	4,066.4	0.3	0.0	4,083.4
Windrow reaper	Agri_Mobile	6,152.0	0.4	0.1	6,177.7
Harvester	Agri_Mobile	207.3	0.0	0.0	208.1
Vegetable transplanter	Agri_Mobile	99.8	0.0	0.0	100.2
Power cutter	Agri_Mobile	72.3	0.0	0.0	72.6
Pruner and shredder	Agri_Mobile	3,670.2	0.3	0.0	3,685.4
Bark stripper	Agri_Mobile	1,777.5	0.1	0.0	1,784.8
Dehusker and peeler	Agri_Mobile	193.9	0.0	0.0	194.7
Spouter	Agri_Mobile	9,409.2	0.7	0.1	9,448.5
Crop transport vehicle	Agri_Mobile	13,386.6	0.9	0.1	13,442.3
Furrow	Agri_Mobile	455.0	0.0	0.0	456.9
Fertilizer applicator	Agri_Mobile	2,987.5	0.2	0.0	3,000.0
Soil pulverizer	Agri_Mobile	29.1	0.0	0.0	29.3
Soil breaker	Agri_Mobile	93.9	0.0	0.0	94.3
Crop washer	Agri_Mobile	155.5	0.0	0.0	156.1
Tea leaf harvester	Agri_Mobile	109.0	0.0	0.0	109.5
Crop dryer	Agri_Stationary	137,188.9	18.7	1.1	138,009.3
Grain dryer	Agri_Stationary	132,310.0	18.1	1.1	133,103.2
Agricultural heater	Agri_Stationary	1,031,143.3	138.8	8.3	1,037,222.9
Mushroom. cultivation sterilizer	Agri_Stationary	77,600.4	10.4	0.6	78,054.0
Heating feed mixers	Agri_Stationary	205.7	0.0	0.0	206.9
Agricultural cargo vehicle	Road Transportation	369,326.4	25.1	3.0	370,820.6
Agricultural loader	Construction	35,404.6	2.4	0.3	35,548.1
Agricultural excavator	Construction	2,170.0	0.1	0.0	2,178.8
Agricultural drone	Agri_Mobile	275.6	0.0	0.0	276.7
Agricultural ship	Agri_Mobile	270.4	0.0	0.0	271.5
SUM		3,708,317.3	344.3	30.1	3,725,931.1

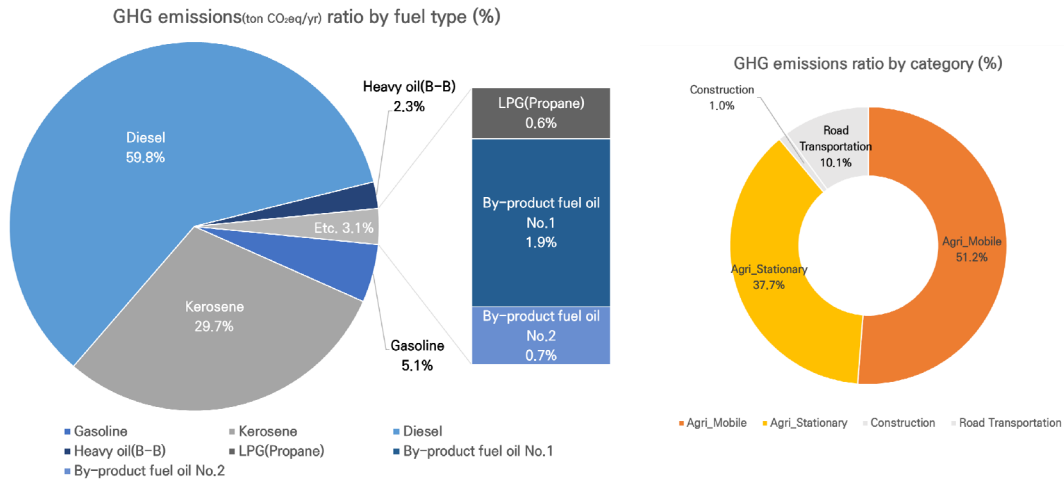


Fig. 3. GHG emissions ratio by fuel type and emission source category (%)

리 보고서 상 농림업 에너지 부문 온실가스 배출량 1.41 백만톤 CO₂eq. 대비 2.33 백만톤 CO₂eq.이 높은 것으로 분석되었으며, 배출량 차이가 발생한 주요 원인은 2가지로 판단된다.

첫째, Table 1에 정리한 바와 같이 면세유 공급 대상 농업기계 42종 대비 농업기계 보유현황 조사 또는 이용실태 조사 시 조사 대상이 되는 농업기계 종류의 차이로 인하여 연료를 소비하는 농업기계가 많이 누락되어 상태로 배출량이 산정되고 있다. 온실가스 인벤토리 작성의 주요 원칙 중 하나인 모든 배출원을 대상으로 산정해야 하는 완전성(Completeness)을 고려한다면, 실제 면세유 등 연료를 사용하고 있는 농업기계를 기준으로 분류체계를 개선하여야 할 것으로 판단된다.

둘째, 면세유 공급 대상 농업기계에는 앞서 기술한 바와 같이 농업용 화물자동차, 농업용 굴착기, 농업용 로더 등이 포함되어 있어 유종별 소비량이 도로수송, 건설업 등 타 부문에서 산정될 여건이 높다. ‘석유류수급통계’ 작성 시 활용하는 자료인 ‘거래상황기록부(주유소용)’를 보면, 차량 출하와 차량외 출하량으로 구분하여 유종별로 기록하여 보고하도록 되어 있다. 이 때 농업용 화물자동차 운행으로 소비되는 연료 소비량은 농림어업 부문이 아닌 차량출하 화물차 부문에 포함되어 산정될 여건이 높으며, 건설기계인 농업용 굴착기, 농업용 로더는 차량외 출하_건설업 부문에 포함되어 산정될 여건이 높다. 이러한 상황에서 본 연구를 통하여 산정된 농업용 화물자동차와

농업용 굴착기, 농업용 로더의 온실가스 배출량은 408,547.6 ton CO₂eq.으로 전체 배출량 3,725,931.1 ton CO₂eq. 중 10.96%를 차지하고 있어 타 부문에서 산정되는 경우 농업 에너지 부문 온실가스 배출량이 낮아지게 된다. 따라서 농림어업부문의 온실가스 배출량은 약 4,900여 개소의 면세유 취급 주유소¹⁶⁾를 대상으로 별도 조사, 분석하고 ‘석유류수급통계’ 상 농림어업부문의 소비량과 상호 비교, 검증하여야 할 것으로 판단된다.

4.3. 대기오염물질 배출량

본 연구를 통하여 산정된 2021년 농업기계 부문 대기오염물질 배출량은 CO 102,768.5 ton/yr, NO_x 24,594.1 ton/yr, SO_x 444.5 ton/yr, PM-2.5 1,255.7 ton/yr, VOC 9,495.4 ton/yr, NH₃ 64.5 ton/yr으로 분석되었다.

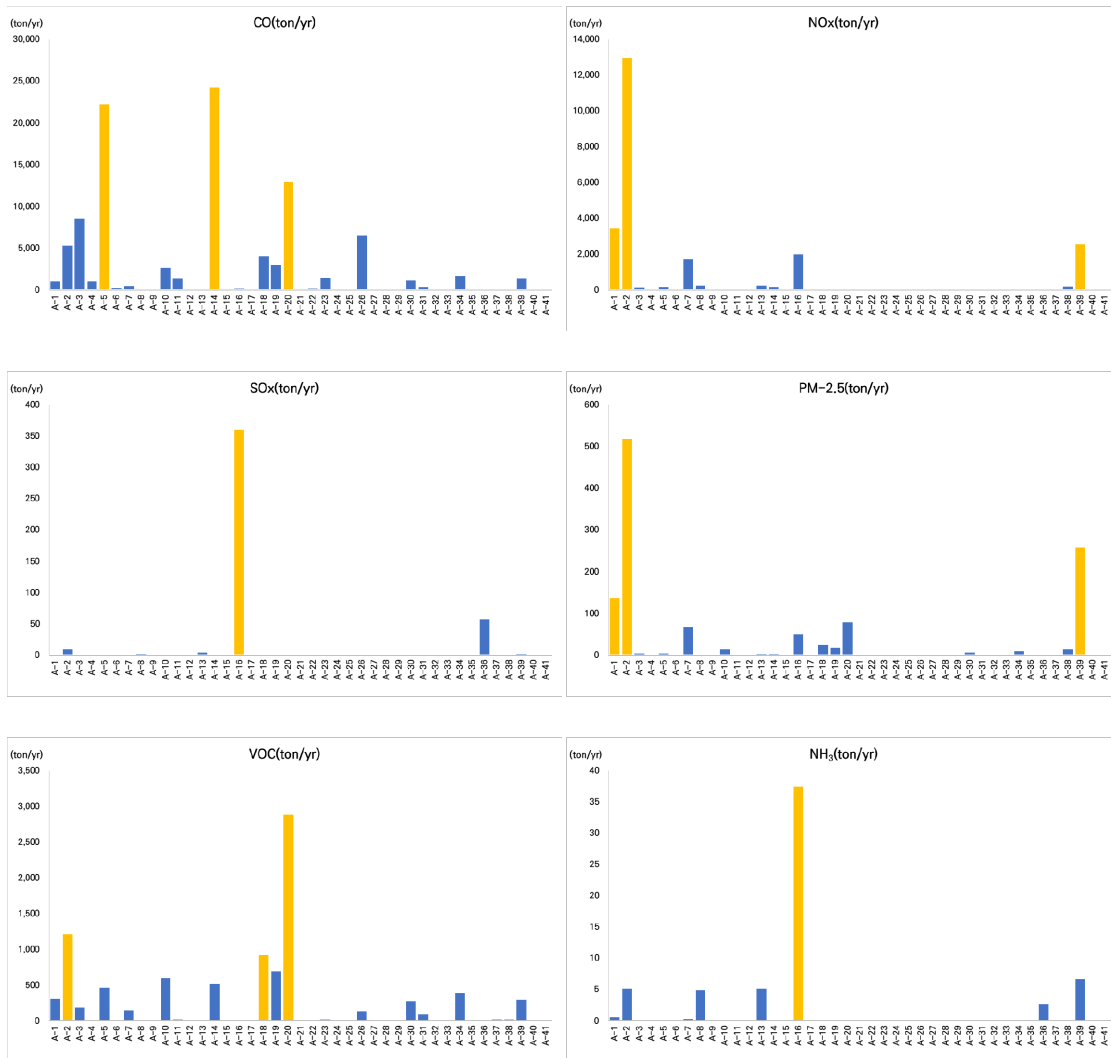
대기오염물질별 주요 배출 농업기계는 CO의 경우 휘발유를 연료로 사용하는 관리기(24,375.7 ton/yr, 23.7%), 고속분무기(22,341.6 ton/yr, 21.7%), 동력예취기(12,978.6 ton/yr, 12.6%) 등이 주요 배출원으로 분석되었다. NO_x는 트랙터(13,003.6 ton/yr, 52.9%), 경운기(3,471.8 ton/yr, 14.1%), 화물자동차(2,591.9 ton/yr, 10.5%) 등이 주요 배출원이며, SO_x는 등유 외 증유를 사용하는 난방기(360.9 ton/yr, 82.1%), 버섯재배소독기(57.8 ton/yr, 13.0%)가 주요 배출원으로 분석되었다. PM-2.5의 경우 트랙터(519.5 ton/yr, 41.4%), 화물자동차(259.8 ton/yr, 20.7%), 경운기(138.4 ton/yr, 11.0%), 동력예취기(80.4 ton/yr, 6.4%), 콤팩

16) '24년 9월 오픈넷 정보 기준(<https://www.opinet.co.kr/>)

Table 12. Air pollutant emissions by agricultural machinery in 2021

Agricultural machinery		Source classification ¹⁾		Emission (ton/yr)					
				CO	NOx	SOx	PM-2.5	VOC	NH ₃
A-1	Tiller	Non-road transport	A	1,095.9	3,471.7	1.5	138.4	313.9	0.7
A-2	Tractor			5,416.9	13,003.6	10.8	519.5	1,220.4	5.3
A-3	Power sprayer			1,095.9	35.4	0.0	1.3	25.3	0.0
A-4	Speed sprayer			22,341.6	208.7	0.4	5.2	472.6	0.1
A-5	Combine			564.0	1,755.5	0.8	69.9	158.5	0.4
A-6	Rice transplanter			8,643.8	157.7	0.2	5.0	196.5	0.1
A-7	Seeder			112.1	1.1	0.0	0.0	2.4	0.0
A-8	Water pump			3,137.5	17.4	0.1	19.7	699.6	0.0
A-9	Thresher			4.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0
A-10	Self-propelled thresher			5.7	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0
A-11	Reaper binder		304.6	2.6	0.0	0.1	6.5	0.0	
A-12	Crop binding machine		2.0	1.4	0.0	0.1	0.2	0.0	
A-13	Cultivator (+Weeder)		1,492.5	12.8	0.0	0.3	31.9	0.0	
A-14	Multipurpose cultivator		24,315.7	210.7	0.4	4.9	526.4	0.1	
A-15	Mower		12,978.6	44.3	0.3	80.4	2,893.9	0.1	
A-16	Lawn mower		1,785.0	6.3	0.0	11.1	398.0	0.0	
A-17	Windrow reaper		2,715.5	9.3	0.1	16.8	605.5	0.0	
A-18	Harvester		36.8	1.7	0.0	0.1	0.9	0.0	
A-19	Vegetable transplanter		51.6	0.4	0.0	0.0	1.1	0.0	
A-20	Power cutter		16.3	0.4	0.0	0.1	3.6	0.0	
A-21	Pruner and shredder		1,261.5	12.6	0.0	8.1	281.3	0.0	
A-22	Bark stripper		457.3	9.1	0.0	3.1	102.0	0.0	
A-23	Dehusker and peeler		84.0	0.3	0.0	0.5	18.7	0.0	
A-24	Spouter		4,156.5	14.2	0.1	25.8	926.8	0.0	
A-25	Crop transport vehicle		6,573.5	63.8	0.1	1.6	141.3	0.0	
A-26	Furrow		235.3	2.0	0.0	0.0	5.0	0.0	
A-27	Fertilizer applicator		1,539.7	13.5	0.0	0.3	33.0	0.0	
A-28	Soil pulverizer		12.6	0.0	0.0	0.1	2.8	0.0	
A-29	Soil breaker		39.8	0.2	0.0	0.2	8.9	0.0	
A-30	Crop washer		31.8	1.0	0.0	0.2	7.1	0.0	
A-31	Tea leaf harvester		48.2	0.6	0.0	0.0	1.0	0.0	
A-32	Crop dryer	Non-industry combustion	C	32.8	293.6	4.8	4.0	1.7	5.2
A-33	Grain dryer			31.8	286.5	2.6	3.8	1.6	5.1
A-34	Agricultural heater			236.3	2,035.9	360.9	52.7	18.0	37.6
A-35	Mush. cultivation sterilizer			17.7	72.3	57.8	3.0	1.0	2.8
A-36	Heating feed mixers			0.8	2.1	0.0	0.1	0.2	0.0
A-37	Agricultural cargo vehicle	Road transport	D	1,509.2	2,591.9	2.9	259.8	302.1	6.7
A-38	Agricultural loader	Non-road transport	E	135.0	231.8	0.3	16.3	29.6	0.1
A-39	Agricultural excavator			9.7	20.5	0.0	1.5	2.6	0.0
A-40	Agricultural drone	Other	F	121.7	0.4	0.0	0.8	27.1	0.0
A-41	Agricultural ship			116.6	0.5	0.0	0.7	26.0	0.0
SUM				102,768.5	24,594.1	444.5	1,255.7	9,495.4	64.5

1) A: Agricultural machinery (reflected), B: Agricultural machinery (Not reflected), C: Agriculture, livestock facilities, D: Cargo vehicle, E: Construction equipment, F: Other (Not reflected)



- | | | |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| A-1: Tiller | A-2: Tractor | A-3: Rice transplanter |
| A-4: Power sprayer | A-5: Speed sprayer | A-6: Reaper binder |
| A-7: Combine | A-8: Grain dryer | A-9: Self-propelled thresher |
| A-10: Windrow reaper | A-11: Cultivator | A-12: Harvester |
| A-13: Crop dryer | A-14: Multipurpose cultivator | A-15: Vegetable transplanter |
| A-16: Agricultural heater | A-17: Power cutter | A-18: Spouter |
| A-19: Water pump | A-20: Mower | A-21: Thresher |
| A-22: Furrow | A-23: Fertilizer applicator | A-24: Dehusker and peeler |
| A-25: Crop binding machine | A-26: Crop transport vehicle | A-27: Crop washer |
| A-28: Soil pulverizer | A-29: Soil breaker | A-30: Pruner and shredder |
| A-31: Bark stripper | A-32: Seeder | A-33: Agricultural ship |
| A-34: Lawn mower | A-35: Tea leaf harvester | A-36: Mush. cultivation sterilizer |
| A-37: Agricultural drone | A-38: Agricultural loader | A-39: Agricultural cargo truck |
| A-40: Agricultural excavator | A-41: Heating feed mixers | |

Fig. 4. Air pollutant emissions by agricultural machinery (ton/yr)

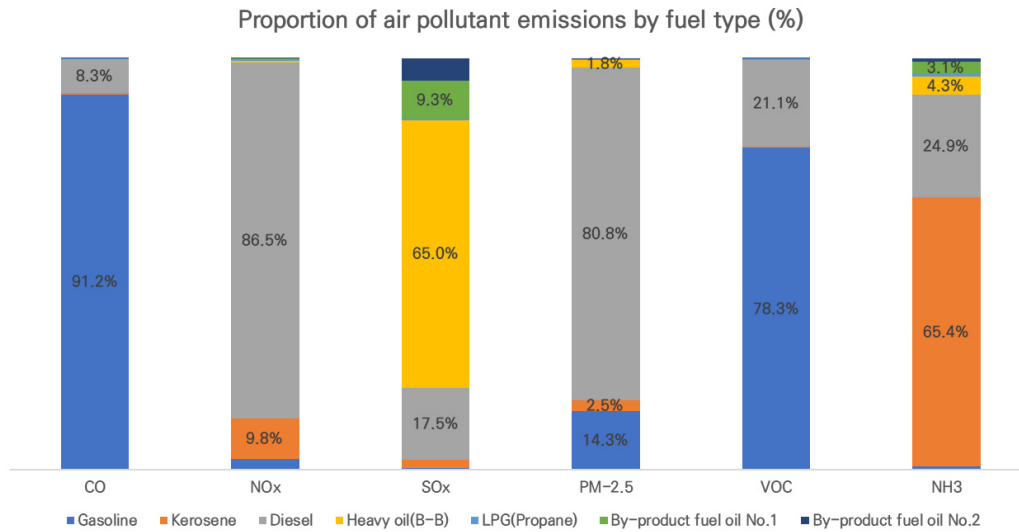


Fig. 5. Proportion of air pollutant emissions by fuel type (%)

바인(69.9 ton/yr, 5.6%) 등이 주요 배출원으로 분석되었다. VOC는 동력예취기(2,893.9 ton/yr, 30.5%), 트랙터(1,220.4 ton/yr, 12.9%), 병충해방제기(926.8 ton/yr, 9.8%) 등이 주요 배출원이며, NH₃는 난방기(37.6 ton/yr, 58.2%), 화물자동차(6.8 ton/yr, 10.5%), 트랙터(5.3 ton/yr, 8.1%), 농산물건조기(5.3 ton/yr, 8.1%), 곡물건조기(5.1 ton/yr, 7.9%) 등이 주요 배출원으로 분석되었다.

유종별 대기오염물질 배출 비중(%)은 휘발유의 경우 CO(91.2%), VOC(78.3%)에서 가장 많은 배출 비중(%)을

차지하고 있으며, 경유는 NOx(86.5%), PM-2.5(80.8%)에서 가장 많은 배출 비중(%)을 차지하고, 등유는 NH₃(65.4%), 중유는 SOx(65.0%)에서 가장 많은 배출 비중(%)을 차지하고 있는 것으로 분석되었다.

국가 대기오염물질 배출원 분류체계를 기준으로 비교하기 위하여 배출원에 따라 분석한 결과 Table 13과 같이 난방기, 건조기 등 고정 배출원¹⁷⁾에서 배출되는 대기오염물질은 CO 319.4 ton/yr, NOx 2,690.3 ton/yr, SOx 426.2 ton/yr, PM-2.5 63.6 ton/yr, VOC 22.4 ton/yr, NH₃ 50.7

Table 13. Air pollutants emissions by emission source classification

Source classification		Emission (ton/yr)						
		CO	NOx	SOx	PM-2.5	VOC	NH ₃	
Non-industry combustion	Agriculture, livestock facilities	319.4	2,690.4	426.2	63.6	22.4	50.7	
Non-road transport	Agricultural machinery	Reflected ¹⁾	42,418.1	18,651.3	13.9	759.1	3,089.5	6.6
		Not reflected ²⁾	58,138.8	407.3	1.1	153.9	5,996.0	0.3
	Subtotal	100,556.9	19,058.6	15.1	913.0	9,085.5	6.9	
	Construction equipment	144.7	252.3	0.3	17.8	32.2	0.1	
Road transport	Cargo vehicle	1,509.2	2,591.9	2.9	259.8	302.1	6.7	
Other	(Drone, Ship)	238.3	0.9	0.0	1.5	53.1	0.0	
SUM		102,768.5	24,594.1	444.5	1,255.7	9,495.4	64.5	

1) Agricultural machinery reflected in the CAPSS classification.

2) Agricultural machinery not reflected in the CAPSS classification.

17) CAPSS (Clean Air Policy Support System)기준 비산업연소_농업·축산·수산업시설 부문에 포함된다.

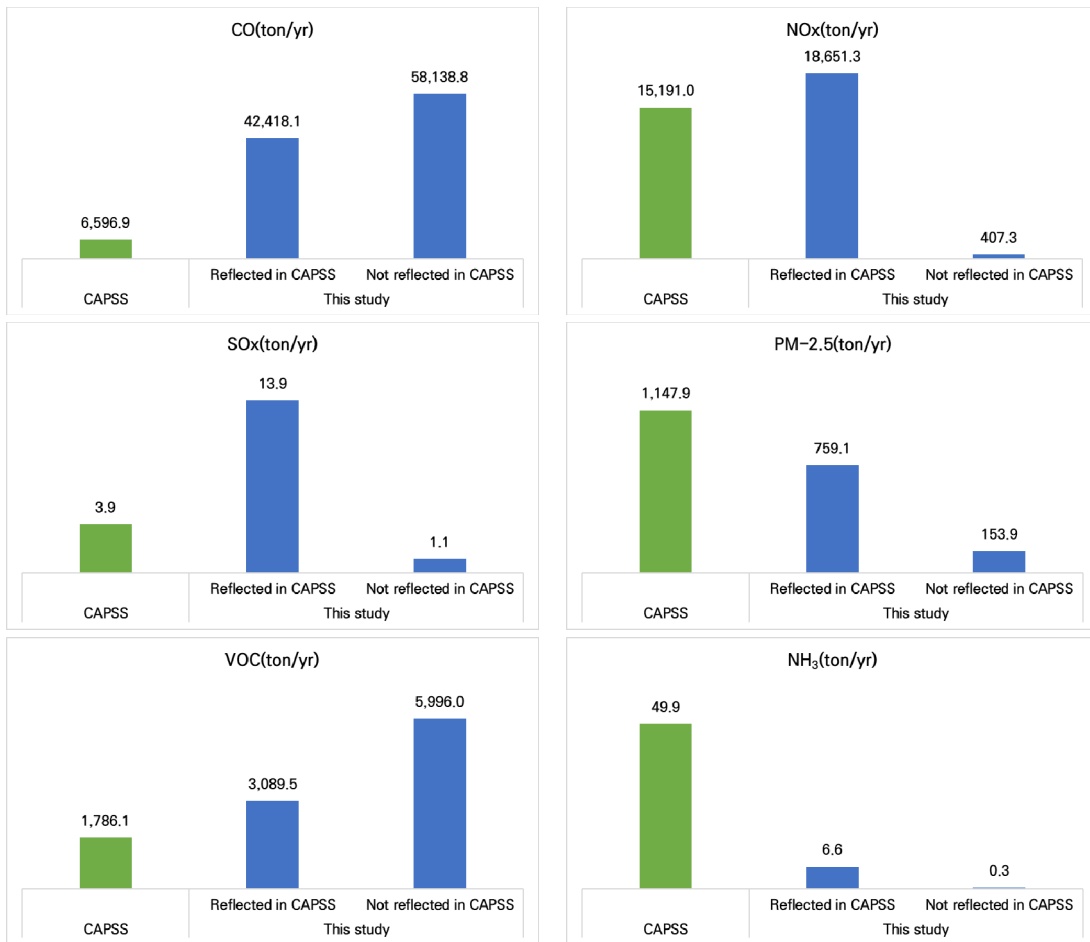


Fig. 6. Comparison of CAPSS and this study's emissions by air pollutant

ton/yr으로 분석되었다. 이동 배출원 중 농업기계에서 배출되는 대기오염물질은 CO 100,556.9 ton/yr, NOx 19,058.6 ton/yr, SOx 15.1 ton/yr, PM-2.5 913.0 ton/yr, VOC 9,085.5 ton/yr, NH₃ 6.9 ton/yr으로 분석되었다. 다른 이동 배출원 분류체계에 반영되어 있는 농업용 화물차 및 건설기계에서 배출되는 대기오염물질은 CO 1,653.9 ton/yr, NOx 2,844.2 ton/yr, SOx 3.2 ton/yr, PM-2.5 277.6 ton/yr, VOC 334.3 ton/yr, NH₃ 6.9 ton/yr으로 분석되었다.

농업기계만을 대상으로 본 연구 결과와 2021년 국가 대기오염물질 배출량 통계(NAIR, 2024)와 비교한 결과 배출계수 및 적용 활동자료의 차이로 일부 대기오염물질에서는 차이가 많은 것으로 분석되었다. 고정배출원은 국가 배출량 통계에는 수산업시설 부문 배출량이 포함되어 있으며, 본 연구는 배출원 소분류 중 1, 2, 3종(보일러) 시설이 포함되지 않은 면세유 공급 대상인 농업경영체 중심

의 배출량 산정 결과로 직접적인 비교는 불가능하지만, 국가 배출량 통계 대비 CO는 38.7% 수준으로 분석되었으며, NOx 80.6%, SOx 105.8%, PM-2.5 46.9%, VOC 49.8%, NH₃ 38.5% 수준으로 나타났다.

이동배출원은 휘발유를 사용하는 농업기계의 배출량을 반영한 결과로 인하여 국가 배출량 통계 대비 CO는 1,524.3%, VOC는 508.7% 수준으로 분석되었으며, NOx 125.5%, SOx 382.7%, PM-2.5 79.5%, NH₃ 13.9% 수준으로 나타났다. 특히, 배출원 분류체계에 포함되지 않은 농업기계의 경우 대부분 휘발유를 사용하는 농업기계로서 CO와 VOC의 배출량 차이에 많은 기여를 한 것으로 나타나 현재 미반영되어 있는 유종에 대한 추가 반영과 배출량 산정 대상 농업기계 종류에 대한 현행화가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 연료 사용 시 동시에 배출되는 온실가스와 대기오염물질의 연관성을 고려, 기존 국가 온실가스 및 대기오염물질 인벤토리 작성 방법 대신 동일한 배출원 분류체계와 활동자료를 활용하여 농업 에너지 부문의 온실가스와 대기오염물질의 인벤토리를 작성하고자 하였다. 배출량 산정은 현행 통계조사 시 누락되어 있는 농업기계 및 미적용되고 있는 유종을 고려하여 면세유 공급대상 농업기계로 보다 세분화된 분류체계를 설정하고, 면세유 공급실적을 활동자료로 활용하여 배출량을 산정하였다. 주요 결과와 시사점을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 농업경영체에게 공급하고 있는 면세유를 기준으로 배출량을 산정한 결과 농림업 에너지 부문 온실가스 배출량은 2021년 기준 3.74 백만톤 CO₂eq.으로 국가 온실가스 배출량 중 농림업 에너지 부문 온실가스 배출량인 1.41 백만톤 CO₂eq. 대비 2.33 백만톤 CO₂eq.이 높은 것으로 나타났다. 주요 원인은 활용한 활동자료의 차이로서 국가 온실가스 배출량 산정 시 활용하는 활동자료는 농업/임업/어업 부문으로 합산하여 생산되고 있는 ‘석유류수급통계’로 농업/임업 및 어업 부문으로 분류하는 방법은 농업/임업/어업 부문 연료 소비량 총량에서 어업부문 연료 소비량을 뺀 나머지를 농림업 부문에 적용하고 있다. 특히, 농업/임업/어업 부문의 면세유 공급 대상에는 화물자동차, 로더, 굴삭기 등도 포함되어 있으며, 이러한 공급 대상은 ‘석유류수급통계’ 생산 시 타 부문인 수송 또는 건설 부문에서 연료를 소비하는 것으로 산정될 수 있다. 따라서 향후 농업/임업/어업 에너지 부문의 온실가스 배출량 산정 시 각 부문별 면세유 공급량과 ‘석유류수급통계’ 내 농림어업 부문 연료 소비량 자료와의 비교, 검증하는 과정이 필요하다고 판단된다.

둘째, 농업 에너지 부문에서 온실가스와 동시에 배출되는 대기오염물질 배출량은 CO 102,768.5 ton/yr, NO_x 24,594.1 ton/yr, SO_x 444.5 ton/yr, PM-2.5 1,255.7 ton/yr, VOC 9,495.4 ton/yr, NH₃ 64.5 ton/yr으로 휘발유를 사용하는 농업기계의 배출량을 반영한 결과로 인하여 국가 배출량 통계 대비 CO는 1,524.3%, VOC는 508.7% 수준으로 높은 것으로 나타났다. 또한, 이동배출원 중 현행 대기오염물질 배출량 산정 대상 농업기계 8종 이외 실제 현장에서 면세유를 공급받아 운영되고 있는 농업기계 23종이 누락되어 있는 것으로 분석되었다. 따라서 현재 국가 대기오염물질 배출량 산정과정에서 미반영되어 있는 유종

에 대한 추가 분석과 배출량 산정 대상 농업기계 종류에 대한 현행화가 필요하다고 판단된다.

마지막으로 본 연구에 따른 분석 결과는 농업 에너지 부문 탄소중립 관련 정책의 수립 및 이행평가에 효율적인 활용이 가능할 것으로 판단된다. 농업기계별 온실가스 배출량의 경우 상위 10개 농업기계의 온실가스 배출량이 전체 배출량의 95.0% 이상을 차지하고 있다. 이동배출원 기준으로 온실가스 배출량이 높은 트랙터, 콤파인, 경운기, 관리기, 고속분무기 등을 대상으로 친환경농업기계 개발 및 보급이 우선적으로 이루어져야 단기적 온실가스 감축 효과가 클 것으로 판단된다. 또한, 난방기, 건조기, 버섯재배소독기 등 고정배출원은 온실가스 배출량 상위 10개 농업기계에 포함되어 있는 바, 온실가스와 대기오염물질 통합 관리 측면에서 증유, 부생연료유 등의 연료 전환이 우선 추진되어야 할 것으로 판단되며, 중장기적으로는 재생 에너지 보급 등을 통하여 에너지원의 전환을 조속히 진행하여야 할 것으로 판단된다. 그리고 농업용 화물차, 농업용 로더, 농업용 굴삭기는 국가 인벤토리 상 타 분류체계에 반영되어 있는 배출원으로 각 부문별 주관 부처와의 협의를 통하여 저감 대책의 관리 주체 및 범위를 구분하여야 할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업 “기후-에너지 위기 대응 지역재생 기술 개발 및 현장 실증(연구개발과제번호: RS-2022-RD009983)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Cheu SM, Moon JH, Kim YJ, Sung JH. 2019. A study on the improvement of GHG inventory in agriculture and forestry categories of energy sector (in Korean with English abstract). J Korea Acad-Ind Coop Soc 20(11): 294-304. doi: 10.5762/KAIS.2019.20.11.294
- EEA (European Environment Agency). 2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory and Research Center). 2024. 2023 National greenhouse gas inventory report.
- Han GG, Jeon JH, Kim MW, Choi ES, Kim MH, Kim SM. 2020. Analysis of air pollutant emissions from

- cultivator and speed sprayer. Proceedings of the KSAM & ARCs 2020 Autumn Conference; 2020 Oct 18; Online. Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 89.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 1 general guidance and reporting, Chapter 7: Precursors and indirect emissions.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2024. 2027 IPCC methodology report on inventories for short-lived climate forcers.
- KAMICO (Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative). 2022. Agricultural machinery yearbook.
- Kim HK, Lee SY. 2022. Analysis of greenhouse gas emission of agricultural tractor under full load. Proceedings of the KSAM & ARCs 2022 Autumn Conference; 2022 Nov 2~Nov 4; Daegu, Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 222.
- Kim NE, Lee GH, Lee DH, Moon BE, Choi GM, Kim HT. 2020. Analysis of greenhouse gas emissions according to the using time of agricultural heaters. Proceedings of the KSAM & ARCs 2020 Autumn Conference; 2020 Oct 18; Online. Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 183.
- Kim NE, Moon BE, Lee GH, Choi GM, Kim HT. 2021. Comparison of exhaust gas concentration according to the grain dryer year to use. Proceedings of the KSAM & ARCs 2021 Spring Conference; 2021 Apr 30; Wanju, Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 170.
- Kim YJ, Kim WS. 2022. Evaluation of emission factor of agricultural tractors using Portable Emission Measurement System(PEMS). Proceedings of the KSAM & ARCs 2022 Autumn Conference; 2022 Nov 2~Nov 4; Daegu, Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 201.
- Kim YJ, Park JY, Park YG, Choi JY, Song SH, Moon JH. 2018. A study on energy consumption and carbon dioxide emission in agricultural sector (in Korean with English abstract). Jeonju, Korea: Rural Development Administration. R&D Report. doi: 10.23000/TRKO201900016008
- Kim YJ. 2022. Improvement of the method for calculating emissions from agricultural machinery and construction machinery(1). Cheongju, Korea: Ministry of Environment National Air Emission Inventory and Research Center.
- Kim YJ. 2023. Improvement of the method for calculating emissions from agricultural machinery and construction machinery(2). Cheongju, Korea: Ministry of Environment National Air Emission Inventory and Research Center.
- Korean Government. 2020. The second national greenhouse gas statistics comprehensive management plan(2020~2024).
- Lee SE, Kim WS. 2023. Evaluation of engine load factor of the multi-purpose cultivator by three different type of operations. Proceedings of the KSAM 2023 Spring Conference; 2023 Apr 27~Apr 28; Daejeon, Korea: Korean Society of Agricultural Machinery. p. 113.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2023. Agriculture, forestry, livestock and food key statistics.
- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2013. 2011 national air pollutants emission.
- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2023. National air pollutant emissions calculation manual(VI).
- NAIR (National Air Emission Inventory and Research Center). 2024. 2021 national air pollutants emission.
- RDA(Rural development administration). 2022. Survey on the use of agricultural machinery.
- Shin CS, Park TS, Hong DH, Kim TH. 2019. Analysis of air pollutant emissions from agricultural machinery in South Korea. J Korean Soc Manuf Process Eng 8(3): 14-25. doi: 10.14775/ksmpe.2019.18.3.014
- Statistics Korea. 2023. Current status of agricultural machinery.
- UN (United Nations). 2015. Paris Agreement.