



전과정평가 기법을 활용한 국내 작물보호제의 온실가스 배출량 평가

손휘림* · 이지선** · 설세환* · 정순철*** · 이종식**** · 임송택*****

*에코네트웍(주) 지속가능성사업본부 팀장, **에코네트웍(주) 지속가능성사업본부 주임,
에코네트웍(주) 지속가능성사업본부 부문장, *농촌진흥청 국립농업과학원 기후변화생태과 연구관, *****에코네트웍(주) 연구소장

Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Domestic Pesticide Product Based on Life Cycle Assessment

Son, Whi Lim* · Lee, Ji Seon** · Seol, Se Hwan* · Jung, Soon Chul*** · Lee, Jong Sik**** and Lim, Song Tak*****

*Team Leader, Sustainability Division, Econetwork Co., Ltd., Sunnam, Korea

**Consultant, Sustainability Division, Econetwork Co., Ltd., Sunnam, Korea

***General Manager, Sustainability Division, Econetwork Co., Ltd., Sunnam, Korea

****Researcher, Division of Climate Change & Agroecology, NIAS, RDA, Wanju, Korea

*****Research Director, Econetwork Co., Ltd., Sunnam, Korea

ABSTRACT

Purpose: The main objective of this study was to analyze the domestic pesticide process through life cycle assessment (LCA). The subjects of this study were ten kinds of specific pesticide processes by formulation type. These produce over 93 percent of pesticides in Korea. The reference flow is defined as the 'product of 1 kg of pesticide' and site-specific annual data was collected for LCA. Thus, this study accumulated basic information on the environmental impact of pesticides and agriculture, and also contributes to the advancement of a certification program and strengthens climate change response capability in South Korea.

Key words: Agriculture, Pesticide, Greenhouse Gas, Global Warming, Life Cycle Assessment

1. 서 론

전 세계는 과거 무분별한 화석연료의 사용과 급속한 산업화로 인하여 기후변화 (Climate Change)와 지구온난화 (Global Warming) 같은 전지구적인 환경문제에 국면해 있다. 국제 포럼에서는 2030년까지 현재 상태의 지구 온도를 낮출 수 없다면 기후변화로 인한 사망자가 1억 명 이상 발생할 것으로 예측하고 있다 (DARA, 2012). 이와 같이 환경문제에 대한 인식은 점차 높아지고 있으며 국내에서도 2015년 6월, 파리기후변화협약에서 2030년 국가 온실가스 감축 목표를 2030년 배출전망치 (Business As Usual: BAU) 대비 37%로 결정하였다. 이에 따라 2016년 12월 '2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵'이 확정되었고, 최근 국가 온실가스 감축목표

의 이행 가능성을 높이기 위하여 로드맵이 수정되었다. 정부는 온실가스 감축을 위하여 전환, 산업, 폐기물, 건물, 수송, 공공, 농축산 분야에서 2012년부터 온실가스·에너지 목표관리제도, 2015년부터 온실가스배출권거래제도를 시행하고 있으며, 해당 산업에서의 온실가스 배출 규제를 강화하고 있다. 이와는 별도로 각 산업부문에서 자발적인 온실가스 감축을 위해 다양한 제도가 시행되고 있다. 1차 생산품을 제외한 일반 산업부문에서는 환경부의 '탄소성적표시제도'가 활발하게 운영 중에 있으며, 임업에서는 '탄소저장량표시제도'가 2017년부터 본 사업을 시작하였다. 특히 농업분야에서는 대표적으로 '저탄소농축산물인증제도'가 있으며, 2012년 시범사업을 시작으로 2017년부터는 본 사업이 실시되었다. '저탄소농축산물인증제도'는 「농업·농촌 및 식품산업 기본법」에 근거

† **Corresponding author:** dmzworld@econetwork.com, (Econetwork Co., Ltd., Sunnam-si, Gyeonggi-do, 13494, Korea. Tel:+82-31-702-3300)

Received November 7, 2019 / Revised November 20, 2019 / Accepted December 4, 2019

하고 있으며, 식량, 과수, 채소, 특용 부문 51개 농산물의 국가 평균 온실가스 배출량보다 인증을 신청하는 품목의 온실가스 배출량이 적을 경우 인증 마크를 부여하는 선진적인 제도이다. 온실가스 배출량 평가는 환경부하를 정량적으로 산정 가능한 전과정평가 (Life Cycle Assessment: LCA)를 기본으로 하며, 비료, 에너지, 기타농자재, 작물보호제의 사용량과 각 온실가스 배출계수를 통하여 평가한다. 특히 온실가스 배출계수는 국가 전과정목록 (Life Cycle Inventory: LCI) 데이터베이스가 활용되고 있으며, 이는 현재 환경부와 산업통상자원부에서 약 400건 이상 데이터베이스를 개발하였다. 그러나 현재 유일하게 작물보호제 전과정목록 데이터베이스만 구축되지 않아 해외 자료를 인용하고 있으며 온실가스 배출량의 타당성과 완전성 측면에서 문제가 제기되고 있다. 또한 학계에서는 농업분야의 다양한 온실가스 배출량 산정 연구가 진행되었으나, 대부분의 연구는 전과정평가 기법을 활용한 사과와 배의 배출량 산정 (Lee et al., 2014), 마늘의 배출량 산정 (Yoon et al., 2012), 재배 시 투입되는 비료의 배출량 산정 (Jung et al., 2012)과 같이 농산물 재배와 친환경 비료 위주로 연구되었다. 특히 일반 농산물 재배에 대한 연구에서도 작물보호제의 환경성 정보가 구축되지 않았기 때문에 해외 자료를 인용함으로써 국내 실정을 완벽하게 반영하지 못한 부분이 있다. 이와 같이 농업 부문에서는 온실가스 관련 정책, 제도 및 연구가 활발하게 진행되고 있으나 작물보호제 부문에 대한 온실가스 관련 연구는 전무한 상황이다. 반면 유럽과 미국에서는 이미 작물보호제의 전과정평가 연구가 활발하게 진행되었으며, 이를 통하여 전과정목록 데이터베이스가 이미 상당수 구축되어 있다. 유럽은 에코인벤트 (Ecoinvent)를 선두로 하여 작물보호제 원료물질에 대한 전과정목록을 약 70건 이상 개발하였으며, 스위스의 World Food LCA Database에서는 작물보호제 전과정목록 데이터베이스 개발 가이드라인을 제공하고 있다. 또한 미국에서는 농림부 (U.S. Department of Agriculture: USDA)에서 농업의 전반적인 전과정목록 데이터베이스를 관리하고 있으며, 미국의 아칸소주립대학과 네덜란드의 Blonk Consultants에서 작물보호제 관련 전과정평가 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 이와 같이 해외에서는 작물보호제와 관련된 전과정평가 연구가 활발하게 진행되고 있으나 국내에서는 아직까지 연구된 사례가 없다. 따라서 본 연구에서는 농업분야의 기후변화 관련 제도의 개선, 온실가스 배출량 산정의 타당성 및 완전성을 확보하고 작물보호제의 기후변화 관련 기초 환경성 정보의 인프라 구축을 통한 기후변화 대응의 역량 강화를 목적으로 국내 시판되는 작물보호제 총 10종에 대하여 전과정평가를 수행하였

다. 이를 통하여 작물보호제 생산 공정에 대한 온실가스 배출량을 정량적으로 제시하였으며, 제도 내 활용 가능한 온실가스 배출계수의 보완과 국내 작물보호제 산업의 전반적인 온실가스 배출량을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 방법론

본 연구에서는 잠재적인 환경영향을 정량적으로 산정할 수 있는 과학적인 평가 기법인 전과정평가를 적용하였다. 전과정평가는 국제표준화기구 (International Organization for Standardization: ISO)의 14040과 14044에 의거하고 있으며, 제품 및 서비스의 전과정 동안 투입되는 모든 재화와 에너지, 배출되는 모든 제품과 폐기물의 양을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 평가하는 방법이다 (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006).

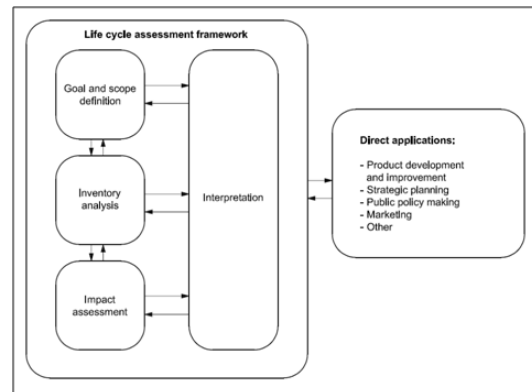


Fig. 1. Stages of an LCA based on ISO 14040.

전과정평가는 크게 4가지 단계로 구성되어 있으며, 첫 번째 단계가 목적 및 범위정의, 두 번째 단계가 목록분석, 세 번째 단계가 영향평가, 마지막인 네 번째 단계가 전과정해석이며, 모든 단계는 상호 보완적으로 수행될 수 있다. 목적 및 범위정의 단계에서는 연구목적과 대상 제품 또는 서비스의 기능, 기능단위, 기준흐름, 시스템경계, 할당규칙, 가정 및 제한 사항 등을 선정한다. 목록분석 단계에서는 연구 대상의 기능을 수행하기 위한 모든 투입물 및 산출물을 수집하고 이를 계산하여 정량화하는 단계이다. 영향평가 단계에서는 목록분석 결과인 환경부하를 영향범주별로 특성화인자를 곱하여 환경영향을 산정하는 단계이다. 전과정해석 단계에서는 초기 선정된 연구 목적과 범위에 맞게 전과정 목록분석 결과와 영향

평가 결과를 해석하는 단계이다.

3. 목적 및 범위의 정의

3.1 목적정의

본 연구의 목적은 국내 작물보호제의 지구온난화 영향을 정량화하기 위하여 제조 공정에서 발생하는 환경부하를 산정하고 이를 통하여 온실가스 배출량을 평가하는 것이다. 그러나 국내 작물보호제는 약 1,500건 이상 시판되고 있으며 (Korea Crop Protection Association, 2016) 모든 작물보호제에 대한 온실가스 배출량을 산정하는 것은 불가능하며, 점유율이 상위에서 해당하는 일부에 대해서만 평가하는 것은 본 연구의 결과의 활용도 측면에서 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 연구 대상을 선정할 시 작물보호제 생산공정이 제품의 제형별 (Formulation Type)로 유사함을 기준으로 하였으며, 세부 제형 기준으로 연구 대상을 선정하였다. 국내에서 시판되는 작물보호제의 세부 제형은 총 39종으로 구분되며, 각 대표 제형의 생산 점유율 90% 이상 고려 가능하도록 세부 제형을 총 10종 선정하였다. Table 1에 본 연구의 대상과 국내 생산 점유율 정보를 나타내었다 (Agrochemical Year Book, 2016).

3.2 범위의 정의

연구의 목적에 따라 연구 대상으로 선정된 총 10종의 작물보호제 제조 공정에서 발생하는 온실가스를 평가하기 위해 시스템경계 (System Boundary)는 전과정단계 (원료채취, 제

조, 수송, 사용, 폐기) 중 제조단계만 고려하였다. 국내 작물보호제의 원료물질인 원제는 95% 이상을 수입에 의존하고 있으며, 원제를 포함하여 온실가스를 평가하기 위해서는 1,500개 제품의 모든 원제 함유량을 통계자료를 기반으로 하여 반영해야 한다. 그러나 신제품 개발과 기존 제품의 단종 등으로 제품의 트렌드가 반영될 시에는 기존 연구의 결과에 대한 개정이 반드시 필요하기 때문에 결과의 활용성 증대를 위하여 본 연구에서는 제조 공정에 대한 기초 연구를 우선 수행하였다. 다음의 Fig. 2에 시스템경계를 나타내었다.

전과정평가 수행 시 연구의 대상에 대하여 반드시 기능 및 기능단위, 기준흐름을 설정해야 한다. 본 연구에서 작물보호제 생산공정의 기능은 ‘농산물을 유해생물로부터 보호하고, 품질을 유지하며, 상품가치를 높이는 작물보호제를 생산’하는 것으로 정의하였으며, 기능단위는 ‘작물보호제 1 kg 생산 공정’, 기준흐름은 ‘작물보호제 1 kg 생산’으로 정의하였다. 또한 연구에 활용된 데이터의 품질을 평가하기 위한 정보인 데이터 품질요건 (Data Quality Requirement)은 Table 2에 나타내었다.

전과정평가는 현장 데이터 수집의 완전성과 환경부하를 산정하기 위한 다양한 인자들의 구축 수준에 따라 결과가 유동적이다. 따라서 결과의 재현성과 동등한 비교 연구를 위해 연구에 적용된 가정 및 제한사항을 반드시 기술하여야 한다. 본 연구에 적용된 가정 및 제한사항은 다음과 같다.

- 1) 작물보호제 관련 설비 및 인프라를 구축하는 과정에 대한 환경부하는 고려하지 않았다 (Lee et al., 1998).
- 2) 에너지원으로 사용되는 LNG 및 LPG의 비중은 ‘대기

Table 1. Subject of research (Agrochemical Year Book, 2016)

Categories		Annual Production (kg)	Cumulative Market Share (%)
Major	Minor (Subject)		
Emulsifiable concentrate	Emulsifiable concentrate	4,538,499	56.3%
	Soluble concentrate	2,976,911	93.2%
	Wettable powder	5,182,654	76.2%
Wettable powder	Suspension concentrate	1,181,973	93.5%
	Water dispersible granule	406,990	99.5%
Granule	Granule	3,368,232	99.4%
Water soluble powder	Water soluble powder	97,261	86.3%
	Water soluble granule	15,404	100.0%
Dustable powder	Dustable powder	63,305	91.4%
	Fine granule	5,946	100.0%

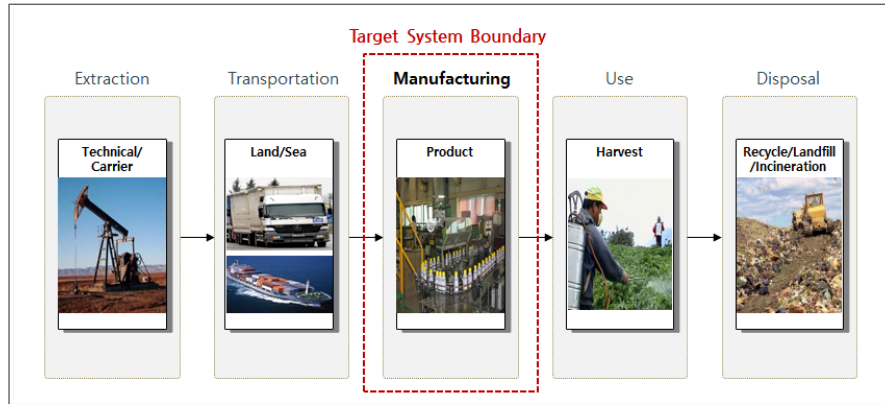


Fig. 2. System boundary of the study.

Table 2. Data quality requirement

Types of boundary	Up/Down Stream (LCI DB)	Target (Manufacturing)
Time-related boundary	Up-to-date period	2016
Geographical boundary	Korea	Site specific
Technical boundary	Up-to-date technology	Site specific

환경보전법 시행규칙」의 ‘별표10. 배출시설의 시간당 대기오염물질 발생량 산정방법’값을 활용하여 계산하였다.

- 3) 화석연료의 직접연소에 따른 CO₂, CH₄, N₂O 배출량 계산은 국가 LCI DB 구축 기준에 따라 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1996과 2006 가이드라인의 배출계수를 적용하였다.
- 4) 에너지원별 순발열량 정보는 「에너지법시행규칙」의 ‘별표. 에너지열량 환산기준’을 적용하였다.
- 5) 화석연료의 직접연소에 따른 Non-CO₂ 배출량 계산은 국립환경과학원의 ‘국가대기오염물질배출량산정방법편람 (Ⅲ)’ 배출계수를 적용하였다.
- 6) 온실가스 중 CH₄와 N₂O의 지구온난화지수 (Global Warming Potential: GWP)는 각각 21과 310을 적용하였다.

4. 결론 및 고찰

4.1 전과정 목록분석

4.1.1 데이터수집

한국작물보호협회 정회원사를 대상으로 국내 작물보호제

주요 생산업체 (총 8개社)의 현장 데이터를 모두 수집하였으며, 이는 국내 시장점유율 70% 이상 고려 가능하다. 또한 본 연구의 결과는 국가 전과정목록 데이터베이스로 활용할 목적이 있기 때문에 대표성 확보가 매우 중요하며, 일반 기준인 ‘생산점유율 50% 이상 확보’ (환경부, 2003)를 상회하는 수준으로 데이터 수집을 진행하였다. 데이터 수집은 연간 데이터를 수집하여 계절적 요인으로 인한 데이터 변동을 최소화하였으며, 다음 Table 3에 데이터 수집항목과 출처를 나타내었다.

4.1.2 데이터계산

일반 제품에 대한 전과정평가 수행 시 수집한 데이터를 토대로 모든 투입/산출물의 물질수지 (Mass balance)를 정확하게 계산하여야 한다. 원료물질 (Raw material)은 제품 (Product)과 부산물 (Co-product)의 양과 동일해야 하며 보조물질 (Ancillary material)은 전량 폐기 (Disposal)되는 것을 원칙으로 한다. 본 연구의 전과정평가는 제조공정에 대한 평가이기 때문에 원료물질은 없으며 에너지수지 (Energy balance)에 대한 계산만 포함되었다.

Table 3에 언급한 수집 데이터들은 모두 국내에서 제조되고 처리되기 때문에 이에 대한 상/하위 흐름의 간접적인 환경부하는 모두 기 구축된 국내 전과정목록 데이터베이스를 적

용하였다. 작물보호제 제조과정에서 사용하는 에너지 중 전기 및 스팀을 제외한 화석연료는 제조업체 현장 내에서 연소에 따라 다양한 대기오염물질을 발생시키기 때문에 이와 같은 직접적인 환경부하는 온실가스 유발 물질 (CO₂ emissions) 과 비유발 물질 (Non-CO₂ emissions)로 구분하여 계산하였다.

화석연료 연소로 인하여 발생하는 대표적인 온실가스 유발 물질들은 CO₂, CH₄, N₂O가 있으며, 연료사용량과 순발열량, 발열량 당 온실가스 배출계수를 통하여 수식 (1)을 이용하여 배출량을 계산하였다.

$$CO_2 \text{ Emissions} = \sum_j (Fuel_j \times LHV_j \times 10^{-6} \times Ef_j) \quad (1)$$

Fuel_j는 화석연료별 사용량 (kg, L 또는 Nm³), LHV_j는 연료 사용량을 열량 기준으로 변환하기 위하여 적용하는 순발열량 (kg/MJ, L/MJ 또는 Nm³/MJ)을 의미하며, 이를 TJ 단위

로 환산 (10⁶)하고 최종적으로 각 연료별 온실가스 배출계수인 Ef_j를 곱하여 온실가스 배출량을 산정한다. 본 연구에 적용된 화석연료별 순발열량과 온실가스 배출계수는 Table 4에 나타내었다.

그 외 온실가스 비유발 물질에는 CO, NO_x, SO_x, TSP, PM10, VOC, NH₃가 있으며, 전과정평가시에 함께 고려해야 한다. 이는 지구온난화에는 영향을 미치지 않으나 그 밖의 영향범주 (Impact Category)에 속하기 때문이며 본 연구에서도 기타 대기오염물질 배출량을 다음 수식 (2)와 같이 산정하였다.

$$Non-CO_2 \text{ Emissions} = \sum_j (Fuel_j \times Ef_{other,j}) \quad (2)$$

Fuel_j는 위와 동일한 화석연료별 사용량 (ton, kl 또는 천 m³)이며, 기타 대기오염물질의 배출계수인 Ef_{other,j} (kg /

Table 3. Data collection category

Category	Material	Data Source			LCI DB Information	
		Site	Calculation	Estimation	Ref.	Year
Ancillary material	Industrial water	○			ME ^{a)}	2003
	Electricity	○			MOTIE ^{b)}	2000
	Steam	○			MOTIE	2003
Energy	LNG	○			ME	2007
	LPG	○			MOTIE	2006
	Diesel	○			MOTIE	2001
	Kerosene	○			MOTIE	2006
	Air emissions		○		-	-
Waste	General waste	○			ME	2003
	Designated waste	○			ME	2003
	Waste water	○			ME	2012

a) MOTIE : Ministry Of Trade, Industry & Energy

b) ME : Ministry of Environment

Table 4. CO₂ emission factor and heating value of fuel

Fuel types	Net heating value	Emission factor (kg/TJ)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diesel	35.2 MJ/L	74,100	3.0	0.6
Kerosene	34.2 MJ/L	71,900	3.0	0.6
LPG	58.4 MJ/Nm ³	63,100	1.0	0.1
LNG	38.9 MJ/Nm ³	56,100	1.0	0.1

ton, kg / kl 또는 kg / 천m³) 만을 곱하여 산정한다. 본 연구에 적용된 화석연료별 기타 대기오염물질 배출계수는 Table 5에 나타내었다.

이와 같이 수집한 데이터의 간접 환경부하는 국가 전과정 목록 데이터베이스를 통하여 포함하였으며, 직접 환경부하는 국제적으로 통용되는 IPCC 2006 가이드라인에 따라 계산하였다. 직접 환경부하 중 지구온난화에 영향을 미치는 CH₄과 N₂O의 지구온난화지수 (Global Warming Potential: GWP)는 현재 국내 전과정목록 데이터베이스, 온실가스·에너지목록관리제, 온실가스배출권거래제에서 적용하고 있는 21 kgCO₂ / kgCH₄과 310 kgCO₂ / kgN₂O을 각각 적용하였다. 최종적으로 환경부하를 정량적으로 도출하기 위하여 환경부의 환경성적표지 (Environmental Product Declaration: EPD) 방법론을 적용하였으며, 이에 따라 지구온난화 (Global Warming), 산성화 (Acidification), 부영양화 (Eutrophication), 자원고갈 (Abiotic Resource Depletion), 오존층고갈 (Oxidant Depletion), 광화학산화물생성 (Photochemical Ozone Creation) 총 6가지 영향범주에 대하여 결과를 도출하였다.

4.2 결과 및 고찰

전과정평가의 최종 결과인 영향범주별 잠재적인 환경영향을 정량적 수치로 도출하기 위하여 유럽의 Sima pro 소프트웨어를 활용하였다. 간접 환경부하를 고려하기 위하여 한국 환경산업기술원에서 제공하는 국가 전과정목록 데이터베이스는 소프트웨어 내 모두 입력하였으며, 직접 환경부하는 별도로 계산하여 입력하였다. 본 연구의 결과 도출을 위한 최종 연산과정은 전적으로 프로그램을 활용하였으며, 이를 통하여 발생할 수 있는 휴먼에러를 최소화하였다.

4.3 작물보호제 제조공정의 환경부하 산정

본 연구에서는 분제 (Dustable powder), 액제 (Soluble concentrate), 액상수화제 (Suspension concentrate), 수화제

(Wettable powder), 입제 (Granule), 입상수화제 (Water dispersible granule), 입상수용제 (Water soluble granule), 유제 (Emulsifiable concentrate), 세립제 (Fine granule), 수용제 (Water soluble powder) 총 10개 제형에 해당하는 작물보호제의 제조 공정에 대한 환경영향을 정량적으로 산정하였다. 지구온난화 결과는 대상 작물보호제의 제조 공정별 온실가스 배출량으로 해석할 수 있으며, 전체 결과는 Table 6에 나타내었다.

지구온난화 영향평가 결과 수용제 제조 공정의 환경영향이 0.468 kgCO_{2eq.} / f.u.으로 가장 높았으며, 전기 사용에 따른 환경영향은 전체의 91.9%를 차지하는 것으로 나타났다. 반면 세립제 제조 공정의 지구온난화 결과는 0.0481 kgCO_{2eq.} / f.u.으로 총 10건의 작물보호제 제조 공정 대상 중 가장 낮은 결과를 나타내었으며, 전기의 영향이 54.6%, 화석연료의 연소에 의한 대기배출이 31.1%로 높은 비율을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 국내에서 제조되는 있는 작물보호제의 70% 이상 고려 가능한 실제 업체 데이터를 기준으로 도출되었기 때문에 향후 작물보호제의 제품 기준 전과정평가 수행 시 기초 자료로 활용될 수 있으며, 농업분야의 온실가스 배출량 산정 시 완전성과 정확성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

4.4 현행 제도의 배출량 산정방식 개선

자발적 온실가스 감축 제도로 널리 알려진 ‘저탄소농축산물인증제도’는 비료, 에너지, 기타농자재, 작물보호제에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하도록 하고 있다. 본 연구에서 적용한 전과정평가와 동일한 방식을 채택하고 있으며 비료 시비에 따른 N₂O 대기배출량과 연료 연소에 따른 온실가스 배출량을 직접 배출량으로 산정, 그 외 투입물질들은 제조 단계에서 발생하는 온실가스 배출량을 간접 배출량으로 산정하고 있다. 비료, 에너지, 기타농자재의 경우 환경부, 산업통상자원부, 농림부에서 개발한 국가 전과정목록 데이터베이스를 적용하고 있으나 작물보호제는 국내에서 활용 가능한 데

Table 5. Non-CO₂ emission factor of fuel

Fuel types	Unit	Emission factor						
		CO	NOx	SOx	TSP	PM ₁₀	VOC	NH ₃
Diesel	kg/kl	0.6	2.4	17	0.24	0.22	0.03	0.096
Kerosene	kg/kl	0.6	2.4	17	0.24	0.22	0.03	0.096
LPG	kg/kl	0.384	1.157	0.005	0.036	0.036	0.06	0.013
LNG	g/m ³	1.344	3.7	0.01	0.03	0.03	0.18	0.051

이터베이스가 부재하기 때문에 해외에서 개발된 전과정목록 데이터베이스를 활용하고 있다. 해외 데이터베이스는 작물보호제의 유효성분이 100% 기준으로 구축이 되었기 때문에 제도 내에서 적용 가능한 살균제, 살충제, 제초제, 성장조절제의 유효성분비 기준을 명시하고 있으며, 유효성분비 만큼 값을 보정하여 적용하고 있다. 그러나 이에 대한 불확실성은 첫 번째로 국내 실정이 반영되지 않은 데이터베이스를 활용하는 점, 두 번째로 해외 데이터베이스는 작물보호제의 원제에 대한 정보만 존재하며 제품단계의 공정부하는 제외되었다는 것이다. 이와 같은 문제를 해결하고 제도의 온실가스 배출량 산정방식을 개선하기 위하여 본 연구의 결과가 유용하게 활용될 수 있다. 본 연구의 결과를 반영하여 제도의 작물보호제 온실가스 배출계수를 변경하는 방식은 다음 (3)의 식과 같다.

$$Pesticide\ EF_j = (EF_{j, Technical} \times Ratio_{j, Active\ ingredient}) + EF_{j, Process} \quad (3)$$

EF_{j, Technical}과 Ratio_{j, Active ingredient}는 기존 제도에서 활용 중인 기준값으로 원제에 대한 배출계수와 유효성분비를 의미하며, EF_{j, Process}는 작물보호제 제조 공정에 대한 온실가스 배출계수이다. EF_{j, Process}를 살균제, 살충제, 제초제, 성장조절제 기준으로 도출하기 위해서 본 연구 결과를 다음과 같이 보정하였다.

1) Table 1의 값에 따라 구축된 세부 제형별 제조 공정 온

실가스 배출량을 대표 제형 기준으로 가중 평균하여 값을 산정하였다.

2) Table 7의 값에 따라 살균제, 살충제, 제초제, 성장조절제의 대표 제형별 생산비율을 기준으로 가중 평균하여 최종 제품의 공정에 대한 온실가스 배출량을 산정하였다.

산정된 각 인자에 대한 값과 제도에서 활용 가능한 제품별 작물보호제 온실가스 배출계수 결과는 Table 8에 나타내었다. 이와 같이 작물보호제의 제조 공정별 온실가스 배출 정보는 제도 내 온실가스 배출량 산정 방식의 개선에도 활용될 수 있다.

4.5 국내 작물보호제 업종의 온실가스 배출동향 파악

국가 온실가스 감축 목표인 2030년 BAU 대비 37%를 이행하기 위하여 정부는 업종별로 온실가스 배출 동향을 파악하고, 일정 기준 이상 배출할 시에는 사업장 (배출권거래제 기준 2만 5천톤-CO₂) 또는 업체 기준 (동 제도 기준 12만 5천톤-CO₂)으로 관리하며 배출량을 감축할 수 있도록 규제하고 있다. 이미 500개 이상의 업체들이 의무적으로 매년 사업장 온실가스 배출량을 산정 및 보고하고 있으며, 할당량 (Korean Allowance Unit: KAU)을 초과하지 않도록 내/외부 온실가스 감축 사업을 진행하고 있다. 반면 규제 대상이 아닌 업체들은 기후변화 대응에 동참하기 어려울뿐더러 사업장에서 배

Table 6. Environmental impact results of target pesticide process

Target process	Environmental impact					
	Global Warming (kg CO ₂ eq./f.u. ^{a)})	Abiotic Resource Depletion (kg antimony./f.u.)	Acidification (kg SO ₂ eq./f.u.)	Eutrophication (kg PO ₄ ³⁻ eq./f.u.)	Oxidant Depletion (kg CFC11 eq./f.u.)	Photochemical Ozone Creation (kg C ₂ H ₄ eq./f.u.)
Dustable powder	1.13E-01	6.88E-04	2.09E-04	3.72E-05	1.30E-10	3.26E-06
Soluble concentrate	1.08E-01	6.23E-04	4.09E-04	3.93E-05	1.79E-09	1.50E-04
Suspension concentrate	1.35E-01	7.59E-04	9.39E-04	5.60E-05	4.39E-09	5.38E-04
Wettable powder	1.65E-01	9.95E-04	3.99E-04	5.63E-05	1.18E-09	6.70E-05
Granule	1.18E-01	6.70E-04	6.07E-04	4.69E-05	3.24E-09	2.82E-04
Water dispersible granule	4.07E-01	2.48E-03	1.31E-03	1.38E-04	4.29E-09	4.51E-04
Water soluble granule	2.18E-01	1.30E-03	4.91E-04	7.10E-05	2.11E-09	4.15E-05
Emulsifiable concentrate	1.00E-01	5.91E-04	2.83E-04	3.33E-05	7.10E-10	7.30E-05
Fine granule	4.81E-02	2.69E-04	1.33E-04	1.85E-05	9.05E-10	1.63E-05
Water soluble powder	4.68E-01	2.85E-03	1.82E-03	1.66E-04	6.02E-09	7.97E-04

^{a)} f.u. : Functional Unit

출되는 온실가스의 양이 파악조차 되지 않는 실정이다. 그러나 신기후체제에 대응하기 위하여 자발적인 온실가스 감축 노력뿐만 아니라 업종의 온실가스 배출 동향을 파악할 필요성이 있다.

본 연구의 결과는 작물보호제 업종 전체의 온실가스 배출 동향을 파악할 수 있는 기초 정보로 활용 가능하다. 업종의 온실가스 배출량을 산정할 시에는 사업장에서 화석연료 연소로 인한 온실가스 배출, 그 밖의 생산 공정에서 누출이나 물리/화학반응 등으로 인한 온실가스 배출, 전기와 스팀의 사용에 따른 온실가스 간접 배출을 포함하고 있다 (환경부, 2017). 본 연구에서 고려하는 온실가스 배출활동은 사업장 내에서 발생하는 직접 배출량 외에도 투입되는 모든 재화에 대한 제조 단계에서 발생하는 간접 배출량을 포함하고 있다. 따라서 다음과 같이 값을 보정하여 작물보호제 업종에서만 발생하는 온실가스 배출량을 산정하였다.

- 1) 전기와 스팀을 제외한 모든 투입/산출물의 간접 온실가스 배출은 제외하였다.
- 2) 화석연료의 직접 연소로 인한 CO₂, CH₄, N₂O를 포함하였으며, 지구온난화 지수는 CH₄ 21, N₂O 310을 적용하였다.
- 3) 간접 온실가스 배출계수는 국가 전과정목록 데이터베이스 결과를 적용하였으며, 전기는 0.495 kgCO_{2eq.} / kWh,

스팀은 0.042 kgCO_{2eq.}/MJ을 적용하였다.

- 4) 보정된 세부 제형별 온실가스 배출계수와 ‘농약연보’에 집계된 세부 제형별 2015년 작물보호제 총 생산량의 곱으로 온실가스 배출량 최종값을 산정하였다.

이는 연간 집계된 작물보호제 제품을 제조하기 위하여 업체에서 배출한 온실가스 배출량이며, 연간 2,598톤의 온실가스가 발생하는 것으로 확인하였다. 수입 및 수출에 대한 제조 공정부하, 제조 공정 외 운영 (포장, 사무실, 식당 등), 재고 및 불량률, 업체 생산실적과 통계자료 간의 오차율 등은 고려되지 않았기 때문에 국내 작물보호제 제조업체들의 실제 온실가스 배출량은 이보다 더 높을 것으로 사료된다.

4.6 결론

본 연구에서는 국내 작물보호제 생산 공정에 대한 환경영향을 정량적으로 산정하기 위하여 전과정평가를 수행하였다. 작물보호제의 특성 상 모든 제품에 대한 환경영향을 평가하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 유사한 제조 패턴을 적용할 수 있는 세부 제형 기준으로 총 10종을 선정하였으며, 지구온난화, 자원고갈, 오존층고갈, 산성화, 부영양화, 광화학산 화물생성에 대한 결과를 도출하였다. 모든 환경영향은 정량적인 수치로 비교 가능하며, 연구 결과는 농업 전반에 걸친 전과정평가 연구에 활용할 수 있다.

Table 7. Average production of pesticide by specific formulation type

Formulation type	Fungicides		Insecticides		Herbicides		Plant-growth regulators	
	Production (kg)	Ratio (%)	Production (kg)	Ratio (%)	Production (kg)	Ratio (%)	Production (kg)	Ratio (%)
Dustable powder	28,657	0.5	40,592	0.7	-	-	2	0.0
Water soluble powder	14,564	0.2	96,821	1.6	1,193	0.0	86	0.0
Wettable powder	4,653,588	74.6	841,095	13.9	562,470	14.9	669,327	89.1
Emulsifiable concentrate	543,636	8.7	3,778,029	62.4	2,151,800	57.2	63,750	8.5
Granule	1,001,487	16.0	1,298,665	21.4	1,048,003	27.8	17,855	2.4

Table 8. Emission factor of pesticide by product type

Product	EF _{Technical} (kgCO _{2eq.} /kg)	Ratio _{Active ingredient} (%)	EF _{Process} (kgCO _{2eq.} /kg)	Pesticide EF _{product} (kgCO _{2eq.} /kg)
	A	B	C	A * B + C
Fungicides	9.15	31.7	0.159	3.06
Insecticides	9.36	17.3	0.122	1.74
Herbicides	8.56	14.8	0.118	1.38
Plant-growth regulators	7.59	23.2	0.167	1.93

정부의 BAU 37%의 온실가스 감축목표를 달성하기 위한 일환으로 제품 측면의 자발적 감축노력을 도모하기 위해 운영 중인 ‘저탄소농축산물인증제도’에 활용하여 제도의 개선과 온실가스 배출량 산정 방식의 타당성 및 감축량의 투명성을 확보할 수 있다. 또한 사업장 기준의 배출량을 의무적으로 제한하는 ‘온실가스에너지목표관리제도’와 ‘온실가스배출권 거래제도’에 빚대어 국내 작물보호제 제조업체들의 온실가스 배출동향을 파악할 수 있으며, 동 제도의 대상 업체 및 해당 업체들에 비해 작물보호제 제조업체들의 온실가스 배출 집약도가 적음을 정량적으로 제시 가능하다.

본 연구의 결과는 작물보호제 제조 공정에 대한 환경영향이기 때문에 학술적으로 다양한 연구에 적용할 수 있는 기초 자료로 활용이 가능하며, 산업 측면에서는 체계적인 데이터 관리가 어려운 영세한 업체들에게 연간 출하량 및 제품 제형만으로도 사업장의 온실가스 배출 규모를 파악할 수 있는 단위배출량으로써 활용이 가능하다. 또한 농업에서는 작물보호제들의 온실가스 배출량 비교가 가능하며, 세부 공정별 온실가스 배출 이슈 규명이 가능하기 때문에 저탄소제품 사용을 장려하기 위한 기반자료로도 활용이 가능하다.

향후 이를 농업 전반에 걸친 환경성 평가에 접목시키기 위해서는 최종적으로 제품 내 원제와 증량제, 보조제의 환경부하가 포함되어야 한다. 또한 국가를 대표할 수 있는 데이터베이스 수준으로 활용하기 위하여 원제, 증량제, 보조제의 실제 투입정보를 업체 데이터 또는 기 구축된 통계자료를 일괄된 기준으로 적용할 필요가 있다. 향후 연구에서는 본 연구 결과를 활용하여 원예용, 수도용, 논/밭용의 대표 제형별 살균제, 살충제, 작물보호제, 성장조절제까지 최종 제품 단계로 설정해야 할 것이다. 이에 대한 전과정평가를 수행할 시에는 원제가 포함되었기 때문에 인체독성, 생태독성, 담수독성 등을 포함한 영향범주를 설정해야 하며, 수행 결과는 최종적으로 국가 전과정목록 데이터베이스로 구축하여 활용성을 높여야 한다.

지구온난화와 기후변화가 전지구적 환경문제로 대두되는 시점에서 현재까지 국내에서는 아직도 작물보호제의 기후변화 관련 기초 연구 자료가 매우 부족한 실정이다. 이는 작물보호제에만 국한되는 문제가 아니라 농업 전반의 탄소배출량 산정 방식의 지속적인 한계점으로 작용해왔다. 이에 본 연구의 결과는 국내 작물보호제의 환경성 정보 축적의 기반을 마련하였으며, 더 나아가 농업 분야의 기후변화 대응 역량 강화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 성과물 (논문)은 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ012460022019)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

- DARA. 2012. Report: Climate Crisis Already Causing Unprecedented Damage to World Economy; Human Impact On Large-Scale. Foundation of Agri, Tech, Commercialization & Transfer.
2018. Introduction of Low Carbon Certification Label. <http://www.smartgreenfood.org/>
- IPCC 2006. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2); UNEP, pp. 2.19-2.26.
- ISO 14040. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- ISO 14044. 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- Jung SC, Lee DB, Jeong JW and Huh IJ. 2012. Carbon Emission of Customizes Fertilizer (No. 16) and Comparison with Single Fertilizer. Journal of the Korean Society for Life Cycle Assessment 13:109-119.
- Korea Crop Protection Association. 2016. Pesticide Guide Book.
- Korea Crop Protection Association. 2016. Agrochemical Year Book.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute. 2017. Guideline of Environmental Product Declaration Certification (1); KEITI; Seoul, Korea, pp. 150-163.
- Lee DB, Jung SC, So KH, Kim GY and Jeong HC. 2014. A Study on Carbon Footprint and Mitigation for Low Carbon Apple Production Using Life Cycle Assessment. Korea Journal of Climate Change Research 5 (3): 188-197.
- Lee KM, Hur T, Kim SD. 1998. Guideline and Theory of Environmental Life Cycle Assessment; Korea Accreditation Board; Seoul, Korea.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2017. FRAMEWORK ACT ON AGRICULTURE, RURAL COMMUNITY AND FOOD INDUSTRY. Article 47 (1) of the Act.
- Ministry of Environment. 2003. Standard Guide Book of Development for National Life Cycle Inventory

- Database; Seoul, Korea, p.3.
- Ministry of Environment. 2016. CLEAN AIR CONSERVATION ACT (Enforcement Rule). Table 10.
- Ministry of Environment. 2017. Verification of Emission Activity, A Guide of Greenhouse Gas/Energy Target Management (2); Korea, p.51-59.
- Ministry of Environment. 2018. 2030 National Greenhouse Gas Reduction Road Map Amendment and 2018~2020 KAU Allocation Plan Determination. <http://me.go.kr/home/web/board>.
- Ministry of Trade, Industry and Energy. 2016. ENERGY ACT (Enforcement Rule). Table 1.
- Presidential Decree No. 28583. 2018. ENFORCEMENT DECREE OF THE FRAMEWORK ACT ON LOW CARBON, GREEN GROWTH. Article 25 (1) of the Act.
- Song CH.G, Kim DG, Jin HA, Sin SA, Lee HJ, Lee KM, Kim BE and Sheol SH. 2010. Calculation Guide for National Air Pollutant Emissions; National Institute of Environmental Research (III); Incheon, Korea, pp. 18-22.
- Thomas Nemecek and Thomas Kagi. 2010. Pesticides, Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, v2.2 (15); Ecoinvent: Zurich, Swiss, p.97-103.
- Yoon SY, Kim YR, Kim TH, Park JH and Ahn SW. 2012. Study of Garlic's Carbon Footprint though LCA. Korean Journal of Organic Agriculture 20 (2): 161-172.