Evaluation of Farming Practices for Reduction of Greenhouse Gas Emission in Korean Agricultural Sector

Jong-Sik Lee^{1*}, Gun-Yeob Kim², Eun-Jung Choi², Sun-Il Lee², Chan-Wook Lee², Hyo-Suk Gwon³, and Yoo-Kyung Lee⁴

¹Senior Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

²Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

³Post-doctoral Researcher, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

⁴Researcher, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea

*Corresponding author: jongslee@korea.kr

ABSTRACT

Received: May 1, 2020

Revised: May 21, 2020

Accepted: May 26, 2020

ORCID

Jong-Sik Lee

<https://orcid.org/0000-0002-9101-6811>

Gun-Yeob Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8346-895X>

Eun-Jung Choi

<https://orcid.org/0000-0001-9535-612X>

Sun-Il Lee

<http://orcid.org/0000-0002-0519-3150>

Chan-Wook Lee

<https://orcid.org/0000-0002-8901-8631>

Hyo-Suk Gwon

<http://orcid.org/0000-0003-4030-1134>

Yoo-Kyung Lee

<https://orcid.org/0000-0002-9896-4152>

This study was conducted to provide low carbon farming technique for greenhouse gases(GHGs) emission reduction in agriculture sector. It reviewed literatures on the characteristic of cultivation technique and its effects on carbon emission reduction. The effects of GHGs emission reduction were evaluated in agricultural land with several farming practices. In the rice cultivation technique, the irrigation water management showed good effect on GHGs emission reduction in paddy field. It also evaluated reduction efficiency of source of nitrogen supply and soil improvement. The intermittent irrigation showed 25.1% carbon reduction efficiency as compared to continuously flooded treatment. Slow release fertilizer and ammonium sulphate decreased carbon emission by 19.8% and 7.9% compared to urea, respectively. With soil amendments treatment, silicate fertilizer and zeolite reduced carbon emission 14.1% and 21.7% compared to rice straw treatment. In the upland crop cultivation technique, the efficiency of tillage management, green manure, livestock compost and nitrification inhibitor application were estimated. Substitution of 50% of nitrogen with hairy vetch showed 65.6% carbon reduction efficiency. It also showed 20.4% emission reduction with nitrification inhibitor treatment. However, GHGs emission were increased with livestock compost application. It provided basic data for reducing the GHGs emission in agriculture sector by accomplishing low carbon farming technique and policy project.

Keywords: Farming technique, Greenhouse gas, Emission reduction, Low carbon

Nitrogen fertilizer treatment

Soil improvement additive treatment

Effect of farming practices on GHG emission reduction in paddy field.

Introduction

농업은 인류의 식량안보를 담당하는 산업으로서 농축산물 생산활동 과정에서 에너지 및 농자재 사용으로 온실가스를 배출함과 동시에 기후변화로 인한 직·간접 영향을 많이 받고 있다. 기후변화에 따른 주요 영향 중 하나로 농업환경 변화로 인한 식량문제를 지적하고 있다 (WTO-UNEP, 2009).

전 지구적으로 대기 중 온실가스 농도가 지속적으로 증가함에 따라 기후변화로 인한 질병 및 고온에 따른 스트레스 발생이 많아지고, 가뭄, 폭우 및 폭설과 같은 이상기상으로 인한 피해가 우리 생활에 이미 영향을 주고 있다. 농업에서 작물의 생산과정에 걸친 타격으로 지난 2012년 세계 곳곳에 나타난 가뭄으로 인해 옥수수과 밀의 생산량은 감소하였으며, 이로 인한 전 세계 곡물가격 급등을 경험한 바 있다.

이러한 기후변화 문제에 대응하여 국제사회는 유엔기후변화협약을 통해 기후시스템의 변화를 방지할 수 있는 수준으로 전지구적 온실가스 농도를 안정화하기 위하여 노력하고 있다. 아시아개발은행은 개발도상국들을 대상으로 기후변화 적응 지원사업을 수행하였으며, 그 결과 주요 분야별 기후변화 영향과 요인별 대응책을 제시하였다 (ADB, 2014). 이에 우리나라도 2030년 배출전망치 (BAU; Business As Usual, 온실가스를 감축하려는 특별한 노력을 하지 않을 경우 배출될 것으로 예상되는 미래의 온실가스 양) 대비 37% 감축이라는 국가 온실가스 감축 목표를 제시 (Kwon and Kim, 2017)하고 각 산업 부문별로 감축 이행을 위해 노력 중이다. 농업 비에너지 부문은 BAU 대비 7.9%에 해당하는 약 1.6백만 톤의 감축목표가 할당 되어 감축을 위한 노력을 수행해 나가야한다. 이러한 감축 목표는 2018년 감축 로드맵 수정안이 발표되기 이전의 약 1백만톤 (BAU 대비 4.8%)에 비해 감축 부하가 증가된 양이다. 2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵을 보면 농축산 부문의 주요 감축 이행계획으로 논물관리가 있다. 그러나 농경지 면적이 지속적으로 감소하는 현황에서 물관리만으로 감축 이행에는 어려움이 예상된다. 이에 따라 보다 다양한 이행방안 수립이 절실히 요구된다. 그동안의 연구결과를 보면 탄소배출 저감을 위하여 작물재배 및 축산 분야에서 온실가스 배출을 줄일 수 있는 많은 기술들을 개발하고 있으며, 이 기술들을 활용하여 다양한 저탄소 농업정책이 추진 중에 있다.

농업분야에서 대표적인 온실가스 감축사업으로는 저탄소 농축산물 인증제와 자발적 온실가스 감축사업을 들 수 있다. 저탄소 농축산물 인증제는 재배과정에서 저탄소 농업기술을 적용하여 온실가스 배출이 적은 농축산물을 생산하고 소비자의 저탄소농산물 소비 활동을 자발적으로 유도하는 시장기반형 온실가스 감축 프로그램이다. 한편, 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업은 농가의 온실가스 배출저감 활동을 통해 감축된 탄소 배출량만큼 인센티브를 제공하는 제도이다. 이와 함께 2018년부터 수행되고 있는 논 타작물 재배 지원 사업이 있다. 벼에 비하여 대부분의 논지 밭작물들의 배출량이 적음을 고려하면 농경지 전환에 따라 논에 벼 대신 밭작물을 재배함으로써 재배과정에서 배출되는 온실가스 저감 효과가 기대된다 (Lee et al., 2019).

본 논문은 다양한 저탄소 농업기술들의 온실가스 배출특성 평가를 통해 농업부문 온실가스 감축 이행 방안을 제시하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 저탄소 농업기술과 관련한 기존의 문헌 검토를 통해 농경지 재배관리에 따른 온실가스 배출 특성을 정리하였다.

Materials and Methods

본 논문에서는 온실가스 배출량 감소를 위한 농업분야의 이행 방안 수립을 위하여 다양한 연구들을 통해 개발된 저

탄소 농업기술들 중에서 농경지 재배관리에 따른 온실가스 배출 특성을 문헌조사를 통해 정리하였다. 개발된 기술들 중에서 효과가 검증된 19종이 저탄소 농축산물 인증제도에 적용되고 있다. 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에도 15건이 등록되어 있다. 또한 환경부 상쇄제도 외부사업 방법론 36건 중에서 농업관련 13건이 등록되어 있다. 등록된 기술들 중에는 바이오가스플랜트 등 축산분야, 지열에너지와 목재펠릿 등 원예분야, 그리고 논벼 물관리 및 완효성비료 등 재배분야의 기술들이 있다. 그러나 등록된 기술들 중에서 재배분야에 속하는 기술은 일부이며, 현재까지 온실가스 감축 외부사업 중 재배관련 방법론을 활용하여 등록된 사업은 없는 실정이다.

검토한 온실가스 배출 저감 기술들은 논과 밭에서의 작물 재배에 따른 비에너지 부문 온실가스 감축기술로서 3개 분야로 정리하였다. 첫째, 논에서의 배출 저감기술, 둘째, 밭작물 재배과정에서의 저감기술, 그리고 셋째로 농식품부에서 추진하고 있는 논 타작물 재배 지원 사업과 연계한 농경지 이용형태 전환에 따른 저감을 평가하였다.

벼 재배기술은 농업 비에너지 부문에서의 주요 감축 수단으로 평가 받고 있는 논물관리를 비롯하여 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에 등록되어 있는 주요 기술들을 포함하였다. 벼의 생태형, 질소 공급원, 토양개량제 종류에 따른 온실가스 배출 저감 효과를 검토하였다 (NAS, 2009). 밭에서의 저감 기술은 온실가스 저감을 위한 밭작물 재배 기술들 중에서 감축사업 방법론에는 포함되어 있는 기술과 함께 현재 방법론이 수립되지 않았지만 향후 농업분야 온실가스 감축을 위한 추가 이행방안 수립을 목적으로 검토할만한 기술들이 포함되었다. 질소공급원, 경운관리, 토성 및 질산화억제제 처리에 따른 효과를 정리하였다 (NAS, 2011). 추가로 검토된 기술들은 각각의 연구 목적에 따른 연구 결과를 제시한 것으로서 추후 기술 도입에 따른 작물의 생산성, 토양의 화학성 및 미생물상 등 농업환경에 미치는 영향에 대한 종합적인 평가가 필요할 것이다.

농경지 토지이용형태 변화에 따른 온실가스 저감은 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 신규 방법론에 따른 저감 효과를 평가하였다 (Lee et al., 2019). 논 타작물 재배 지원 사업의 기본 목적은 논에 벼 대신 다른 소득작물 재배를 유도하여 쌀 과잉문제를 선제적으로 대응하고 조사료 및 쌀 이외 식량작물 등의 자급률 제고하기 위하여 실시된 사업이다. 이와 함께 저탄소 농산물 인증을 위한 주요 작물별 국가 평균 탄소배출량 (MAFRA et al., 2018)을 보면 벼에 비하여 대부분의 노지 밭작물들의 배출량이 적기 때문에 농경지 전환에 따라 논에 벼 대신 밭작물을 재배함으로써 재배 과정에서 배출되는 온실가스 저감 효과가 기대된다.

Results and Discussion

논 영농관리 방법에 따른 온실가스 배출 저감기술 벼 재배 기간 중 물 관리가 메탄 발생에 미치는 영향에 관해서는 많은 연구가 수행되었다. 논물관리 방법에 따른 논에서의 온실가스 배출량을 나타낸 결과로 주요 기술로는 간단관개 (중간 물떼기)와 논물 얹게대기가 있다. 상시담수는 벼 이앙부터 벼가 익을 때까지 상시적으로 물을 대는 농법이다. 이에 비해 간단관개는 벼 이앙 후 한 달간 논물을 깊이 대고 1-3주 정도 물을 떼서 논바닥에 실금이 보이면 물을 다시 대어주는 방법이며, 초기담수+논물 얹게대기는 벼 이앙 후 한 달간 논물을 깊이 관개하고 이후 논물을 얹게 (3-5 cm) 하여 자연적으로 말리며 다시 얹게 대어주며, 벼 이삭이 익을 때까지 반복하는 물관리 기술이다.

온실가스 감축 효과는 Table 1에 제시한 바와 같이 상시담수 대비 간단관개로 25.1%, 논물얹게대기로 69.3%를 감축하는 것으로 나타났다. 초기담수+논물 얹게대기는 60.7%의 감축 효과를 보였다. 또한, 물관리를 통한 농업용수 절약 효과를 평가한 연구 결과 (Kim et al., 2015)에 따르면 상시담수에 비해 각각 16.7% 및 54.4%가 감소된다고 하였다. 논물관리 효과와 관련하여 Ling (1995)은 벼의 물 요구도가 적은 시기의 간단관개는 10-37%의 메탄 감축효과가

Table 1. GHGs emission from paddy field with different irrigation water management methods.

Water management	CH ₄ emission (kg ha ⁻¹)	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	GWP (ton CO ₂ -eq ha ⁻¹)	Rate (%)
CF	254.1	0.0018	5.34	100
ID	190.2	0.0042	4.00	74.9
IF + SI	99.9	0.0011	2.10	39.3
SI	78.3	0.0019	1.64	30.7

CF: continuous-flooding, ID: intermittent drainage, IF + SI: initial flooding + shallow irrigation (source: Kim et al., 2015)

있었으며 효율적인 온실가스 감축 방법으로 이용 할 수 있다고 보고하였다. NAS (2009)는 벼논에서 간단관개 효과는 상시담수에 비해 메탄 배출이 47.6% 줄어든 반면, 아산화질소는 27.2% 증가한 것으로 발표 하였다. 이를 지구온난화 지수 (GWP: Gobar Warming Potential)로 환산하여 종합한 결과, 간단관개가 상시담수 처리에 비해 총 43.8% 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

이러한 효과로 인해 논물관리는 저탄소 농축산물 인증사업의 저탄소 기술 뿐만 아니라 ‘논벼 재배 시 물관리를 통한 온실가스 감축 방법론 (사업분야: A05 기타 감축사업)’으로 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에 등록 되어 영농활동을 통한 탄소 배출 저감을 이룬 농가에 대한 인센티브 제공의 기반 기술로 활용되고 있다. 또한, 2030 국가 온실가스 감축을 위한 농업분야의 주요 이행 방안으로 선발된 기술이다.

질소비료 종류별로 메탄 배출량을 비교하여 온실가스 감축 효과를 평가한 결과, 벼 작기 전체 기간의 메탄 총 배출량은 요소 비료구가 329 kg ha⁻¹, 유안 303 kg ha⁻¹, 완효성비료 264 kg ha⁻¹로서 Fig. 1과 같이 요소 처리에 비해 유안과 완효성비료 처리로 7.9 - 19.8% 감축하였다. 벼 재배과정에서 배출되는 온실가스 감축 효과에 있어 완효성비료의 경우에는 질소 유실 및 탈질을 경감시켜 비료 효율을 높일 뿐만 아니라 온실가스 배출 저감에도 효과를 보였다. Schütz et al. (1989)은 질소비종 간의 메탄 배출 연구에서 요소 처리구의 벼 생육 초기에 황산암모늄이나 완효성 비료구에 비하여 메탄 flux가 높았으며, 황산암모늄 사용구에서는 전 생육기간에 걸쳐 메탄 발생량이 가장 적었다고 보고하였다. 이러한 황산암모늄의 효과에 대하여 Jakobsen et al. (1981)은 (NH₄)₂SO₄의 sulfate 이온이 토양 환원을 지연시켜 메탄을 생성할 수 없도록 높은 산화 환원 전위를 유지하여 메탄 생성균을 저해시킨다고 보고하였다. 또한, 완효성비료 이용은 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업의 완효성 비료를 이용한 질소질 비료 사용저감 방법론 (사업분야: A03 합성비료 절감사업)으로 등록되어 있다.

Fig. 1. Effect of methane emission reduction in paddy with different nitrogen fertilizer treatment.

비료사용 절감과 관련하여 감축사업과 별도로 비료의 적정사용 재배를 통한 화학비료 절감기술이 있다. 이는 농경지에 대한 토양검정을 받고, 작물별로 발급받은 비료사용처방서에 따라 비료를 사용하는 기술이다. 기술의 효과는 농경지 양분상태에 따라 작물별로 필요한 만큼 비료를 사용하기 때문에 비료 사용량을 절감하며, 토양 양분집적을 예방할 수 있다. 비료 사용 절감기술은 국제적으로도 지구온난화 대비 질소이용 효율화 방안으로 4R Nutrient Stewardship (Right source, Right rate, Right time, Right place)이 진행되고 있다.

화학비료와 유기물 등 질소공급원별로 온실가스 배출량을 파악하고자 벼 생육기간인 이앙기 - 출수 후 45일 (완숙기)까지 처리별로 배출된 온실가스의 양을 지구온난화지수 (GWP)로 환산하였다. 화학비료 처리에 비해 질소 시비량의 100% 전량을 돈분뇨액비로 사용한 시험구는 135%의 배출이 증가하였고, 돈분퇴비 처리에서는 28%의 온실가스 배출 증가를 보였다 (Fig. 2). 화학비료인 요소에 비해 액비나 가축분 퇴비의 사용시 온실가스 배출량이 증가한 것은 유기질 질소원내 포함되어 있던 탄소원에 의하여 재배기간 중 메탄발생량 증가와 이양전 산화상태의 논에서 N_2O 발생이 많았기 때문이다. 돈분 퇴액비 사용으로는 무기질비료에 비해 메탄의 직접 배출량이 높았다. 그러나 축산 부산물 활용의 경우에는 논에 투입된 이후 재배 과정에서 배출되는 직접배출량을 평가한 것으로 자원순환이라는 전과정을 고려한다면 이와는 다른 결과가 나올 것이다.

토양개량제 처리는 산성토양 및 유효규산 함량이 낮은 농경지에 토양 개량하는 목적으로 규산 및 석회 등을 사용한다. 토양개량제의 처리는 재배양식에 따라 상이한 결과를 나타내어 이앙재배에서는 개량제 무처리에 비하여 규산과 소석회 처리 시에 온실가스 배출량이 증가하였고, 휴립 건답직파는 이앙재배에 비해 온실가스 배출이 적은 것으로 나타났다. 이앙재배에서 토양개량제 처리 시 온실가스 발생이 증가한 것은 사용된 규산 및 소석회가 벼 생육기간동안 유기물 분해를 더욱 촉진시켰기 때문으로 보고된 바 있다.

토양개량제 처리에 따른 온실가스 배출량 평가 결과, Table 2와 같이 석회처리로 증가 하였으나 규산 및 제올라이트

Fig. 2. Effect of greenhouse gas emission in paddy with different nitrogen source.

Table 2. GHGs emission from paddy field with different soil amendments treatment.

Treatment	CH ₄ emission (kg ha ⁻¹)	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	GWP (ton CO ₂ -eq ha ⁻¹)	Rate (%)
Rice straw	310	1.44	6.96	100
Lime	373	1.49	8.29	119
Silicate fertilizer	264	1.40	5.98	86
Zeolite	239	1.38	5.45	78

트 처리에서는 볏짚처리에 비해 감소하였다. 메탄 배출량은 규산 시용구 264 kg ha^{-1} , NPK + 인공제올라이트 시용구 239 kg ha^{-1} , NPK + 볏짚 시용구 310 kg ha^{-1} 로 나타났다. 아산화질소 배출량은 NPK + 석회 시용구 1.49 kg ha^{-1} , NPK + 규산 시용구 1.40 kg ha^{-1} , NPK + 인공제올라이트 시용구 1.38 kg ha^{-1} , NPK + 볏짚 시용구 1.44 kg ha^{-1} 로 나타났다.

이를 지구온난화지수(GWP)로 환산한 결과 NPK + 석회 처리구가 $8.29 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 가장 많았으며, NPK + 규산 시용구 $5.98 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, NPK + 인공제올라이트 시용구 $5.45 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 그리고 NPK + 볏짚 시용구가 $6.96 \text{ ton CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ 로 나타났다. 온실가스 감축 효과는 NPK + 규산 처리가 14.1%, NPK + 인공제올라이트 처리는 21.7%로 인공제올라이트 처리 효과가 큰 것으로 나타났다.

농업에서 배출되는 메탄은 논이 큰 배출원임을 확인하였으며 메탄의 대부분이 생육하는 벼의 통기조직을 통하여 배출된다는 사실을 증명하였다(Cicerone and Shetter, 1981). 이에 따라 벼 생태형별 메탄 발생양상 구명에 있어서 Parashar et al. (1991)은 인도 뉴델리 인근에 재배환경이 유사한 지역에서 재배한 8개의 벼 품종별 메탄 배출량 시험에서 최대 10배 정도의 메탄 배출량의 차이를 보였다고 하였으며, Erda et al. (1993)도 베이징 부근에서 5개의 벼 품종으로 메탄 배출량을 측정한 결과, 개화기에 메탄 배출이 품종간의 2배 정도 차이를 보여 메탄 배출에서 배출량 차이를 보이는 것이 전적으로 품종 선정에 의한 것이라고 하였다.

우리나라에서도 Lee et al. (1999)이 생태형에서 생육기간이 짧은 조생종에 비하여 중생종과 만생종이 높았다고 보고하였다. 이는 만생종이 조생종보다 메탄을 발생하는 담수 일수가 길기 때문이다. 벼 품종별 온실가스 배출량 비교 결과, 남원벼의 총 메탄 배출량은 128 kg ha^{-1} , 장안벼 230 kg ha^{-1} , 만금벼 207 kg ha^{-1} , 풍산벼 197 kg ha^{-1} 그리고 계화벼는 254 kg ha^{-1} 로서 메탄 배출량이 가장 많았다.

따라서 향후 기후변화 대응을 위한 품종 개발에 있어서는 기후, 기상조건에 대한 적응력과 함께 온실가스 배출을 줄일 수 있는 벼 품종 육종을 고려해야할 사항이라고 판단된다.

최근 토양 탄소격리를 통한 기후변화 완화 기술로 바이오차(Bio-char) 활용이 주목받고 있다. 바이오차는 바이오매스가 혐기적 환경에서 열분해를 거치면서 포함되어 있는 탄소가 안정된 형태로 재구성된 고형물이다. 따라서 토양 미생물에 의해 쉽게 분해되지 않는 특성을 지님으로써 투입된 바이오차의 탄소는 오랜 기간 동안 분해되지 않고 토양에 존재하여 반영구적으로 탄소를 격리할 수 있다.

바이오차를 이용한 온실가스 저감 효과로는 Werner et al. (2007)이 바이오차의 높은 기공성으로 인해 토양의 통기성을 개선하여 메탄 배출을 줄일 수 있다고 보고 하였다. 아산화질소의 경우에는 토양내 질소순환과정 중 질산화와 탈질과정 중 중간 생성물로 배출되는데 바이오차 투입으로 암모늄태질소를 흡착하거나 환원 미생물을 증가시켜 탈질과정 중 중간생성물인 아산화질소 배출을 줄일 수 있는 것으로 연구되었다(Yanai et al., 2007).

논에서 왕겨 바이오차를 투입한 후 벼 재배기간 동안의 메탄 배출량을 평가한 결과는 Table 3과 같다. 바이오차를 투입하지 않은 대조구 대비 바이오차를 투입한 요소, 유안, 유박 처리구에서 각각 33.4%, 48.6%, 39.9% 감축 효과가 있었다(MAFRA et al., 2019).

Table 3. Effect of methane emission reduction in paddy with bio-char treatment.

Treatment	Control	Biochar + Urea	Biochar + Ammonium sulfate	Biochar + Oil cake
CH ₄ emission (kg ha ⁻¹)	301.7 ± 73.7	201.0 ± 31.9	154.9 ± 33.8	181.2 ± 34.4

한편, 바이오차 활용에 따른 토양 탄소격리를 평가하기 위해서는 장기간의 탄소량 변화에 대한 자료가 요구됨에 따라 향후 지속적인 탄소 함량 변화 측정을 위한 연구가 필요하다.

밭 재배관리 방법에 따른 온실가스 배출 저감기술 밭에서 녹비작물인 헤어리베치와 축산부산물인 돈분퇴비를 사용하고 아산화질소 배출량을 비교 평가하였다(NAS, 2011). Table 4에 나타난 바와 같이 화학비료 처리가 6.1 kg ha^{-1} , 화학비료 + 헤어리베치가 2.1 kg ha^{-1} 그리고 돈분퇴비 처리가 7.9 kg ha^{-1} 로 대조구인 화학비료 처리에 비해 화학비료 + 헤어리베치 처리구에서 아산화질소 배출량이 65.6% 감소되었다. 본 결과는 배추 재배기간 동안의 배출량만을 평가한 것으로서 연중 배출량을 평가한다면 처리별 배출량이 달라질 수 있을 것이다. 현재, 녹비이용은 녹비작물을 이용한 질소질비료 사용저감 방법론(사업분야: A03 합성비료 절감사업)으로 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에 등록되어 있다.

밭토양에 가축분 처리로 인한 온실가스 배출량을 평가한 연구결과가 있다. 고추, 가을배추 및 콩 재배지 아산화질소 배출량은 Fig. 3과 같이 고추에서 화학비료 처리가 1.6 kg ha^{-1} , 화학비료 + 돈분퇴비 처리는 4.8 kg ha^{-1} 로 나타내 대조구인 화학비료 처리에 비해 약 3배의 아산화질소 배출량이 많았다. 배추는 화학비료 처리가 1.1 kg ha^{-1} , 화학비료 + 돈분퇴비 처리는 1.6 kg ha^{-1} , 콩에서는 화학비료 처리 0.2 kg ha^{-1} 에 비해 화학비료 + 돈분퇴비 처리에서 2.7 kg ha^{-1} 로 아산화질소 배출량이 많았다. Table 4 및 Fig. 3의 결과에서 볼 수 있듯이 돈분퇴비 사용에 있어 주의가 필요하다.

가축분 퇴비 종류에 따른 온실가스 배출량을 비교 평가한 결과도 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 퇴비 종류별 고추 재배지에서 아산화질소 배출량을 비교 한 결과, 화학비료 처리에 비해 돈분퇴비 처리가 아산화질소 배출이 10.9 kg ha^{-1} 로 가장 많은 것으로 나타났으며, 10.1 kg ha^{-1} 의 계분퇴비, 8.1 kg ha^{-1} 의 우분퇴비 처리 순이었다.

Hayakawa (2009)는 Andisol 토양에서 화학 비료, 관행 계분퇴비와 펠렛형 계분퇴비를 처리하여 N_2O 배출에 미치

Table 4. Nitrous oxide emission from *C. cabbage* cultivation with different nitrogen source.

Nitrogen source	N_2O emission (kg ha^{-1})	Rate (%)
Chemical fertilizer (N 100%)	6.1	100
Fertilizer (N 50%) + Hairy vetch (N 50%)	2.1	34.4
Pig compost (N 100%)	7.9	129.5

(Source: NAS, 2011)

Fig. 3. Nitrous oxide emission from upland crop cultivation with pig compost treatment.

는 영향을 조사한 결과, 연간 아산화질소 배출은 펠렛형 계분퇴비가 관행 계분퇴비에 비해 3.9배, 화학비료 처리에 비해 7.1배 높게 나타났다고 보고 하였다. 화학비료 처리에 비해 계분퇴비 처리에서 아산화질소가 높게 배출된 것은 계분에 함유된 유기탄소가 탈질화를 촉진하기 때문이며, 가장 높게 배출된 펠렛형 계분퇴비는 펠렛의 물리적 특성과 펠렛 내부의 혐기성 조건 발달에 따라 탈질이 더욱 촉진되었기 때문이라고 하였다. Rochette et al. (2008)은 퇴비 사용은 화학비료를 사용했을 때 보다 장기간 더 많은 온실가스를 배출 한다고 보고하였다. IPCC (1996)는 유기물 퇴비 사용은 아산화질소 배출을 증가 시키므로 이를 줄이기 위해서는 농경지에 유기물 투입량을 줄이거나, 투입 시기를 조정해야 한다고 권고 하였다. Kim et al. (2017)도 고구마 재배기간 동안 아산화질소의 배출량이 무기질비료 처리에 비해 가축분 처리로 높게 나타남에 따라 온실가스 배출 저감을 위한 가축분 퇴비 사용에 대한 보다 세부적인 연구의 필요성을 강조하였다.

경운관리에 따른 온실가스 감축 효과 평가에 있어 무경운 재배는 경운 재배와 비교하여 노동력과 생산 비용을 절감할 수 있고, 토양의 물리적, 생태적인 조건들을 변화 시키지 않는 효과적인 재배 방법 중의 하나로 평가되고 있다. 아산화질소 배출량은 Table 5와 같이 무경운 재배가 고추에서 3.9 kg ha^{-1} 로 경운에 비해 23.5% 배추에서 4.6 kg ha^{-1} 로 24.6%, 콩에서 0.7 kg ha^{-1} 로 69.6% 감소하였다.

경운 효과에 대한 국외 연구 사례의 경우에는 다양한 결과가 보고되어 있다. 무경운과 경운재배에서 아산화질소 배출 평가는 무경운이 경운에 비해 아산화질소 배출이 높다는 결과 (Ball et al., 1999; Rochette, 2008)가 있는 반면에 경운이 무경운보다 아산화질소 배출이 많다는 연구결과 (Douglas and Crawford, 1993; Keren and Johnson, 1993; Chatskikh and Olesen, 2007; Gregorich et al., 2008)도 있다. Rochette (2008)는 토양 통기성이 토양에서 아산화질소 배출에 어떠한 영향을 주는지에 대해 평가한 결과, 아산화질소 배출은 통기가 불량한 토양에서 무경운을 실시하면 통기성이 양호한 토양에 비해 33배가 높았다고 하였다. 그러므로 아산화질소 배출에 미치는 무경운의 효과는 토양의 물

Fig. 4. Nitrous oxide emission from pepper cultivation with different livestock compost treatment.

Table 5. Nitrous oxide emission from upland crop cultivation with tillage.

Classification	Pepper		C. cabbage		Soy bean	
	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	Rate (%)	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	Rate (%)	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	Rate (%)
Tillage	5.1	100	6.1	100	2.3	100
Non-tillage	3.9	76.5	4.6	75.4	0.7	30.4

(Source: NAS, 2011)

리성 등 다양한 조건에 따라 그 효과가 각기 다르게 나타나는 것으로 보인다.

무경운에 대한 온실가스 감축 효과 평가를 농기계 사용에 따른 에너지 사용량까지 적용한 전과정 영향평가를 수행한다면 보다 확실한 효과가 구명 될 수 있을 것이다. 무경운의 효과는 경운에 사용되는 농기계의 화석연료 소요량을 줄일 수 있다. 또한, 농경지 토양탄소 저장을 통해 온실가스 발생량 감축이 가능하고 토양의 이화학성 개선에 따른 토양의 건전성 증진으로 화학비료 및 농약 사용 절감이 가능하다. 이와 같은 효과로 경운관리는 보존경운에 따른 온실가스 감축 방법론(사업분야: A05 기타 감축사업)으로 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에 등록되어 있다. 또한, 토양탄소 저장기술은 농업부문 국가 저탄소 발전전략의 핵심전략의 하나로 평가되고 있다.

밭 토양의 토성 조건에 따른 아산화질소 배출량을 고추, 배추 그리고 콩을 대상으로 평가하였다(NAS, 2011). 고추 재배기간 중 아산화질소 배출량은 식양토에서 34.1 kg ha^{-1} , 사양토가 8.4 kg ha^{-1} 로 식양토에 비해 사양토에서 75.4% 감소하였다. 이러한 결과는 고추재배지의 토성에 따른 아산화질소 배출량은 식양토에 비해 사양토에서 74.0 - 82.1% 적었다고 한 보고(Kim et al., 2008, 2010)와 일치하였다.

봄배추와 가을배추의 아산화질소 배출량 합은 식양토에서 6.8 kg ha^{-1} , 사양토가 4.1 kg ha^{-1} 로 식양토에 비해 사양토에서 39.7% 감소하였다. 재배 시기별로는 봄배추의 경우에 식양토와 사양토에서 각각 4.6 kg ha^{-1} 및 2.6 kg ha^{-1} 의 발생량을 나타냈으며, 가을배추에서는 각각 2.2 kg ha^{-1} 및 1.5 kg ha^{-1} 가 발생되었다(Fig. 5).

콩의 경우에도 아산화질소 배출량은 식양토에서 1.9 kg ha^{-1} , 사양토가 1.3 kg ha^{-1} 로 식양토에 비해 사양토에서 31.6% 감소하였다.

이와 같이 토성에 있어 사양토에 비해 식양토 재배에서 아산화질소 배출이 높은 원인으로 토양온도와 토양수분 등이 평가되어 있다(Behnke et al., 2012). 그리고 사양토는 식양토에 비해 투수속도가 빠르기 때문에 용존된 온실가스가 지하로 대부분 침투하기 때문에 대기로 배출되는 아산화질소 가스가 적은 것으로 평가된다(Stevens et al., 1997; Arone and Bohlen, 1998; Hou et al., 2000).

Fig. 5. Nitrous oxide emission from upland crop cultivation with soil texture.

Table 6. Nitrous oxide emission from pepper cultivation with nitrification inhibitor.

Treatment	N ₂ O emission (kg ha ⁻¹)	Rate (%)
Chemical fertilizer	10.8	100
Fertilizer + DCD (dicyandiamide)	8.6	79.6

(Source: NAS, 2011)

밭 토양에서 아산화질소 발생을 억제하기 위한 질산화억제제의 효과를 평가하였다. 질산화억제제의 사용은 질산화작용을 지연시켜 온실가스인 아산화질소와 수질오염원인 질산염 감소의 효과적인 수단으로 알려져 있다. 국립농업과학원은 DCD (dicyandiamide)를 질소 사용량의 10% 해당 양을 토양에 처리하여 아산화질소 배출 감축효과를 평가하였다. 연구 결과, Table 6에 나타난 바와 같이 아산화질소 배출량은 화학비료 처리에서 연간 10.8 kg ha^{-1} , 화학비료 + DCD 처리는 8.6 kg ha^{-1} 로 화학비료 + DCD 처리에서 아산화질소 배출량이 20.4% 감소하였다.

질산화억제제 처리 효과에 관한 연구 결과로는 요소비료 사용에 비해 DCD + 요소 사용이 22.6% 감축하였다는 보고 (Akiyama et al., 2000)와 사탕토에 DCD 사용으로 아산화질소 배출이 요소비료 대비 DCD 처리가 60 - 71% 감축하였다는 연구 결과 (Majumdar, 2002)가 있다. 또한, Andosol 토양에서 유안비료에 비해 질산화억제제인 DCS (N-2,5-dichlorophenyl succinamic acid)처리에 의해 75% 저감된다고 하였고, 밀 재배에서 요소비료에 비해 ECC (nitrification inhibitors coated calcium carbide)와 DCD 처리에서 아산화질소 배출이 각각 45%, 53% 감소하였다는 결과가 있다. 현재 우리나라 농업 (비에너지)분야의 재배부문에서의 신기후체제에 대응한 2030년 온실가스 감축 이행방안으로는 논에서의 물관리가 있다. 그러나 온실가스 감축목표 달성을 위해서는 논물관리 외에 추가 감축 방안이 요구되고 있다. 본 결과에서 볼 수 있듯이 그동안 다양한 연구결과들을 통해 도출된 저탄소 농업기술들에 대한 재평가가 필요한 시점이다. 이러한 측면에서 질산화억제제 처리는 농경지에서의 온실가스 감축 이행을 위한 새로운 방안으로 검토할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

농경지 토지이용 변화에 따른 온실가스 배출량 평가 농림축산식품부에서는 밭작물 자급률 향상과 쌀 공급 과잉 해소를 위해 논에 밭작물을 재배하는 토지이용 전환을 추진하고 있다. 본 사업은 농업분야 비에너지의 온실가스 감축 방법 중 효과가 기대되는 사업으로 논에 밭작물을 재배함에 따른 농경지로부터 직접 온실가스 배출량을 평가하였다. Fig. 6은 논에 벼 대신 콩을 재배한 경우에 기대되는 온실가스 감축량을 나타낸 결과이다. 벼 재배의 경우, $4.69 \text{ ton CO}_{2\text{-eq}} \text{ ha}^{-1}$ 의 배출량을 보인 반면 콩을 재배한 경우에는 상대적으로 감축되는 결과를 얻었다. 콩 재배시 물관리 없이 관행적으로 재배한 경우에는 $0.73 \text{ ton CO}_{2\text{-eq}} \text{ ha}^{-1}$ 의 배출량을 보였으며, 작물 재배를 위해 물관리를 하였을 경우에는 $1.01 \text{ ton CO}_{2\text{-eq}} \text{ ha}^{-1}$ 가 배출 되었다. 이러한 결과는 벼 재배시 온실가스 배출량의 가장 큰 부분을 차지하는 메탄 발생이 밭 형태로 전환됨에 따라 배출이 감소했기 때문이다. 메탄 발생에 따른 온난화지수는 벼 재배시 $4.24 \text{ ton CO}_{2\text{-eq}} \text{ ha}^{-1}$ 에서 콩 재배시 물관리 여부에 따라 각각 0.014 및 $0.012 \text{ ton CO}_{2\text{-eq}} \text{ ha}^{-1}$ 로 낮아졌다. 반면에 아산화질소 발생에

Fig. 6. Greenhouse gas emission with land use change in paddy field. * IWM: Irrigation water management

다른 온난화지수는 벼 재배시 $0.45 \text{ ton CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ 에서 1.00 및 $0.72 \text{ ton CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ 로 높아졌다. 또한, 작물 재배기간 동안의 직접배출량을 평가한 결과로서 저탄소농산물 인증 기준인 전과정평가 결과와는 배출량의 차이가 있다. 이와는 별도로 농업·농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론에 신규 등록된 ‘토지의 이용방법 전환을 통한 메탄감축 방법론’을 적용한 온실가스 배출량을 평가할 경우에도 그 차이가 더욱 크게 나타날 것으로 예상된다.

이와 같이 논 타작물 재배지원 사업을 통한 쌀 수급안정 및 타작물 자급률 제고라는 본 사업의 기본 목적 외에 탄소 배출 저감에 따른 농가 신소득 창출을 위한 농업정책 개발의 기초자료로 활용이 기대된다. 이를 위하여 농경지 이용형태 전환에 따른 탄소배출 저감 효과에 대한 보다 신뢰성 높은 평가를 위해서는 현장에서의 많은 적용 사례 조사를 통한 구멍이 요구된다.

Conclusions

농업분야의 온실가스 감축목표 달성을 위한 다양한 이행방안을 제시하고자 다양한 문헌 검토를 통해 농경지 재배 관리에 따른 온실가스 배출 특성을 정리하였다.

논 영농관리 방법에 따른 온실가스 배출 저감기술 검토 결과, 논물관리가 가장 효과적인 것으로 평가 되었다. 간단 관개 및 초기담수 + 논물얹게대기로 상시담수 대비 각각 25.1%와 60.7%의 이산화탄소 배출 저감을 보였다. 이러한 효과에 따라 논물관리 기술은 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업 방법론 등록과 2030 국가온실가스 감축을 위한 농업분야의 주요 이행 방안으로 선발되었다. 이와 함께 질소비종 및 토양개량제 사용 효과를 검토한 결과, 완효성비료 및 유안 사용은 요소 사용에 비해 각각 19.8%, 7.9%의 메탄 발생 저감 효과를 보였다.

밭토양 관리에서는 경운관리, 녹비사용, 가축분 및 질산화억제제 사용 효과를 검토 하였다. 사용 질소량의 50%를 헤어리베치로 대체한 경우 약 65.6% 아산화질소 감축효과를 나타냈다. 질산화억제제 처리도 무처리에 비해 20.4% 감축 효과를 보인 반면 가축분퇴비 사용의 경우에는 농경지로 부터의 온실가스 직접 배출량이 증가하는 결과를 보여 영농관리시 양분관리에 주의를 요한다.

평가된 농업기술들의 탄소저감 효과를 통해 농업농촌 자발적 온실가스 감축사업 및 저탄소 농축산물 인증제도의 활성화를 위한 추가 인증 방법론 개발의 기초자료로 활용이 기대된다. 또한, 장기적인 측면에서의 질산화억제제 처리 등 농업분야 탄소저감을 위한 새로운 이행방안 개발을 위하여 검토되어야 할 기술들을 제시하였다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of “Cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01479702)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- ADB(Asian Development Bank). 2014. Technologies to support climate change adaptation in developing Asia.
- Akiyama, H., H. Tsuruta, and T. Watanabe. 2000. N_2O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere-Global Change Science*. 2:313-320.

- Arone, J.A., and P.J. Bohlen. 1998. Stimulated N₂O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*. 116:331-335.
- Ball, B.C., A. Scott, and J.P. Parker. 1999. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil Till. Res.* 53:29-39.
- Behnke G.D., M.B. David, and T.B. Voigt. 2012. Greenhouse gas emissions, nitrate leaching, and biomass yields from production of *Miscanthus 9 giganteus* in Illinois, USA. *Bioenergy Res.* 5:801-813.
- Chatskikh, D. and J.E. Olesen, 2007. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil Till. Res.* 97:5-18.
- Cicerone, R.J., and J.D. Shetter. 1981. Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion. *J. Geophysic. Res.* 86:7203-7209.
- Douglas, J.T. and C.E. Crawford. 1993. The response of a ryegrass sward to wheel traffic and applied nitrogen. *Grass Forage Sci.* 48:91-100.
- Erda, L. 1993. Agricultural techniques: Factors controlling methane emission. In: L. Gao, L. Wu, D. Zheng, and X. Han, ed. *Proceedings of international symposium on climate change, natural disasters and agricultural strategies*, China Meteorological Press, Beijing. 120-126.
- Gregorich, E.G., P. Rochette, P. St-Georges, U.F. Mckim, and C. Chan. 2008. Tillage effects on N₂O emissions from soils under corn and soybeans in eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.* 88:153-161.
- Hayakawa, A., H. Akiyama, S. Sudo, and K. Yagi. 2009. N₂O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure. *Soil Biol. Biochem.* 41:521-529.
- Hou, A., H. Akiyama, Y. Nakajima, S. Sudo, and H. Tsuruta. 2000. Effects of urea form and soil moisture on N₂O and NO emissions from Japanese Andosols. *Chemosphere-Global Change Science.* 2:321-327.
- IPCC. 1996. *Climate Change 1995: the Science of Climate Change*, WGI contribution to the IPCC Second Assessment Report.
- Jakobsen, P.W.H. Patrick Jr. and B.G. Williams. 1981. Sulfide and methane formation in soils and sediments. *Soil Science.* 132:279-289.
- Keren, J.S., and M.G. Johnson. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Sci. Soc. Amer. J.* 57:200-210.
- Kim, G.Y., B.H. Song, K.A. Roh, S.Y. Hong, B.G. Ko, K.M. Shim, and K.H. So. 2008. Evaluation of greenhouse gases emissions according to changes of soil water content, soil temperature and mineral N with different soil texture in pepper cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 14(6):399-407.
- Kim, G.Y., K.H. So, H.C. Jeong, K.M. Shim, S.B. Lee, and D.B. Lee. 2010. Evaluation of N₂O emissions with changes of soil temperature, soil water content and mineral N in red pepper and soybean field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):880-885.
- Kim, G.Y., W.K. Park, S.I. Lee, J.S. Lee, E.J. Choi, U.S. Na, H.Y. Jang, and S.U. Suh. 2015. Mitigation of greenhouse gas emissions by water management methods in rice paddy field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48(5):477-484. (in Korean)
- Kim, S.U., E.J. Choi, H.C. Jeong, J.S. Lee, and C.O. Hong. 2017. The influence of composted animal manure application on nitrous oxide emission from upland soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(6):530-537. (in Korean)
- Kwon, P.S. and S.J. Kim. 2017. Scenario analysis for the achievement of the 2030 national greenhouse gas reduction goal in the Korean electricity sector. *J. of Environmental Policy and Administration.* 25(2):129-163. (in Korean)
- Lee, J.S., G.Y. Kim, E.J. Choi, S.I. Lee, A.R. Kim, D.K. Jeong, H.K. Park, and G.Z. Lee. 2019. Establishment of GHGs emission reduction evaluation methodology on land use change of paddy field from rice to upland crop cultivation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):352-358 (in Korean)
- Lee, K.B., D.B. Lee, S.B. Lee, J.G. Kim, and Y.W. Kim. 1999. Methane emission among rice ecotype in paddy soil.

- J. of Korean Envi. Agri. 18(1):1-5.
- Ling, S. 1995. Possibility for reducing methane emission from rice paddy fields in China. In IRRN:31-45.
- Majumdar, D. 2002. Suppression of nitrification and N₂O emission by karanjin – a nitrification inhibitor prepared from karanja (*Pongamia glabra* Vent.). Chemosphere. 47:845-850.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer(FACT), Korean Standards Association(KSA). 2018. Operation provision and guidelines on low carbon farm product certificate system. pp.60-61. (in Korean)
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs(MAFRA), Rural Development Administration(RDA), Foundation of Agri. Tech. Commercialization & Transfer(FACT), 2019. The guidebook on low carbon agricultural techniques. pp.236-244. (in Korean)
- National Institute of Agricultural Sciences(NAS). 2009. Cultivation techniques of rice for greenhouse gas emission reduction. Moonyoungdang Publishing Firm. pp.22-78. (in Korean)
- National Institute of Agricultural Sciences(NAS). 2011. Cultivation techniques of upland crop for greenhouse gas emission reduction. Moonyoungdang Publishing Firm. pp.23-51. (in Korean)
- Parashar, D.C., J. Rai, P.K. Gupta, and N. Sin. 1991. Parameters affecting methane emission from paddy fields, Indian J. Radio Space Phys. 20:12-17.
- Rochette, P. 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. Soil Tillage Res. 101:97-100.
- Rochette, P., D.A. Angers, M.J. Chantigny, B. Gagnon, and N. Bertrand. 2008. N₂O fluxes in soils of contrasting textures fertilized with liquid and solid dairy cattle manures. Can. J. Soil Sci. 88:175-187.
- Schütz, H., A. Holzapfel-Pschorn, R. Conrad, H. Rennenberg, and W. Seiler. 1989. A 3 year continuous record on the influence of daytime, season and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy field. J. Geophys. Res. 94:16405-16415.
- Stevens, R.J., R.J. Laughlin, L.C. Burns, J.R.M. Arah, and R.C. Hood. 1997. Measuring the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from soil. Soil. Biol. Biochem. 29:139-151.
- Werner, C., R. Kiese, and K. Butterbach-Bahl. 2007. Soil-atmosphere exchange of N₂O, CH₄, and CO₂ and controlling environmental factors for tropical rain forest sites in western Kenya.
- WTO-UNEP. 2009. Trade and Climate Change WTO-UNEP Report.
- Yanai, Y., K. Toyota, and M. Okazaki. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments.