

Research Article



CrossMark

Open Access

## 에디 공분산 플럭스 자료를 이용한 논, 밭, 과수원의 연간 탄소 흡수량 추정 및 비교

허지나, 심교문, 이병태, 김용석\*, 조세라

농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과

### Estimation and Comparison of Carbon Uptake in Rice Paddy, Dry Cropland and Grove in South Korea using Eddy Covariance Flux Data

Jina Hur, Kyo-Moon Shim, ByeongTae Lee, Yongseok Kim\* and Sera Jo (Climate Change Assessment Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Wanju 55365, Korea)

Received: 6 October 2020/ Revised: 4 November 2020/ Accepted: 11 November 2020

Copyright © 2020 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

#### ORCID

Jina Hur

<https://orcid.org/0000-0003-1746-5966>

Kyo-Moon Shim

<https://orcid.org/0000-0003-1147-8088>

ByeongTae Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4721-4527>

Yongseok Kim

<https://orcid.org/0000-0003-0515-1388>

Sera Jo

<https://orcid.org/0000-0002-9997-722X>

#### Abstract

**BACKGROUND:** To quantify carbon exchange at agricultural ecosystems in South Korea, net ecosystem exchange (NEE) at three croplands including a rice paddy, a bean field and an apple orchard was measured on the basis of the eddy covariance technique.

**METHODS AND RESULTS:** NEE of CO<sub>2</sub> during the growing season (June to September) averaged over the recent two years (2018-2019) was the highest at rice (-4.49 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>), followed by the bean (-3.12 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) and apple (-0.93 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>). The diurnal variation of NEE was the highest at the rice, while the seasonal variation of it was the highest at the bean than others. In terms of yearly

variation, the rice paddy and the bean field absorbed more CO<sub>2</sub> in 2019 compared to 2018, while the apple orchard absorbed less.

**CONCLUSION:** Our results confirmed that these croplands consistently acted as net sinks for CO<sub>2</sub> during the growing season because an amount of CO<sub>2</sub> uptake from photosynthesis was larger than one of its emissions from respiration. The quantification of net CO<sub>2</sub> exchange at agricultural ecosystems may help to better understand the local carbon cycle over various time scales.

**Key words:** Agricultural Ecosystem, Carbon Cycle, Eddy Covariance, Net Ecosystem Exchange

#### 서론

농업, 산림 및 기타 토지 이용(Agriculture, Forestry and Other Land Use, AFOLU)은 기후변화 완화를 위한 방안으

\*Corresponding author: Yongseok Kim  
Phone: +82-63-238-2501; Fax: +82-63-238-3825;  
E-mail: cyberdoli@korea.kr

로 활용되며, 식량안보 및 지속 가능한 발전의 핵심적인 역할을 한다[1]. 즉, 지속 가능한 농업과 산림, 생태계 보호를 통한 탄소 저장고 확대는 기후변화 완화를 위한 주요 방법 중의 하나이다. 그러나 농경지는 몇 년 이상의 긴 시간규모에 대한 작물 생물량(biomass)의 탄소 저장능력 부족으로 산림보다 전지구 육지 탄소 흡수원으로서의 기여도는 상대적으로 낮다고 평가되고 있다[2].

농경지는 긴 시간 규모에 대해 탄소중립(carbon-neutral)으로 인정 받지만, 일별부터 계절까지 다소 짧은 시간 규모에 대해 대기 중 이산화탄소( $\text{CO}_2$ ) 농도의 변화에 강한 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 선행 연구[3, 4]에서 농경지가 자연 식생 지역과 비교하여 지역적으로  $\text{CO}_2$ 의 계절적 변화량을 약 25% 증가시킨다는 결과 보였다. 이러한 지역적, 계절적으로 대기 중  $\text{CO}_2$  농도에 강한 영향을 미치는 농경지의 특성으로 인해, 농경지의  $\text{CO}_2$  교환량 관측 자료는 지역적 탄소 순환을 정량화하고 탄소기후 접합 모형의 오차를 감소시키기 위한 기초자료로서 중요하다.

국내에서도 농경지에 대한  $\text{CO}_2$  플럭스를 측정하고 변화량을 평가하는 연구가 수행되어 왔다. [5]는 우리나라 지역의 산림생태계 (낙엽수림, 침엽수림)와 더불어 2010년 강원도 양구군 해안면의 벼, 감자, 2008년 해남의 벼 등 국내 농업생태계에 대한 탄소 흡수량을 분석하였다. [6]은 2013년 10월부터 1년간 측정된 김제 벼-보리 이모작지와 벼 단작지의 탄소 플럭스를 측정하고 작부체계에 따른 논 생태계의 탄소 수지를 비교하였다. [7]은 2012년 벼 재배기간에 관측된  $\text{CO}_2$  교환량을 정량화하고 계절적 변화를 분석하였다. 대부분의 선행 연구는 우리나라 주식인 벼 중심의  $\text{CO}_2$  측정 및 분석에 집중되어 있다. 그러나 농업생태계의  $\text{CO}_2$  플럭스는 농작물, 작부체계, 환경요인 등에 따라 달라질 수 있기 때문에 장기적인 관측과 분석자료를 기반으로 다양한 농업생태계의 탄소 수지를 정량화하고 연구할 필요가 있다.

본 연구에서는 다양한 농업생태계에 대한 장기적인 관측을 위해 에디공분산 방식을 이용하여 남한지역의 벼, 콩, 사과 재배지역을 대상으로 연속적으로  $\text{CO}_2$  플럭스를 측정하였다. 또한 순 생태계 교환량을 기반으로 농업 생태계 유형별 탄소수지를 정량화하고, 추정 결과를 비교 분석하였다.

## 재료 및 방법

우리나라 농업생태계별 미기상플럭스를 분석하기 위해 전라북도 김제시 밭(콩, 대찬) 생태계, 전라북도 김제시 논(벼, 신동진) 생태계, 경상북도 의성군 과수(사과, 후지) 생태계를 연구 대상지역으로 설정하고, 각 경작지에 플럭스 타워를 구축하였다. 연구 대상지역은 모두 단작지이며, 주변에 큰 도로와 해안이 없는 다소 고르고 평평한 내륙의 농경지이다. 위경도, 해발고도, 취주 거리 등 상세한 연구 대상지역의 정보는 Table 1과 같다.

연구 대상지역(3곳)에 설치된 각 플럭스 타워에서 10 Hz (초당 10회) 속도로 대기 중의  $\text{CO}_2$ , 수증기( $\text{H}_2\text{O}$ ), 3차원 바

람, 온도 등을 측정하였다. 2018년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 수집된 10 Hz 자료에 에디공분산 방법을 이용하여 30분 평균 물리량 플럭스를 계산하였다. 30분 평균 플럭스 자료는 먼저 지형에 따른 공기 흐름의 변화를 고려한 평면 맞추기 회전 (PER; planar fit rotation, [8])과 공기의 밀도 변화를 고려한 밀도 효과 보정[9] 등을 수행하였으며[6], 다음으로 플럭스의 기계적 측정오류와 난류 특성에 따라 발생하는 튀는 자료는 OzFluxQC를 이용하여 제거하였다[10].

야간에 난류 강도가 약할 때는 이유형이나 저류형이 난류 플럭스항보다 더 크게 기여하면서 플럭스 값이 과소평가가 되는 계통 오차가 발생하는데, 이는 과소평가되는 난류 강도의 기준이 되는 마찰 속도( $u^*$ ) 임계점을 설정하여 마찰 속도 보정을 통해 오차를 줄일 수 있다[11]. 본 연구에서는 2개년 도 3개 지점마다 각각 계산된  $u^*$ 의 임계점을 0.05 ~ 0.08  $\text{m s}^{-1}$ [12] 범위 안에서 설정하였으며, 임계점 이하의 야간  $\text{CO}_2$  플럭스자료는 제거하였다. 주간 플럭스 결측 자료 메우기 (gap-filling)과정으로는 FLUXNET의 표준화 방법인 수정된 색인 목록 방법(modified lookup method: MLTM)을 적용하였다[12]. 본 연구에서는 각 관측 지점에서의  $\text{CO}_2$  플럭스 자료가 적게는 18년도 벼, 콩 재배지에서 약 84%, 많게는 18년도 사과 재배지에서 약 98%까지 수집되었고, 결측 보충률이 적게는 18년도 사과 재배지에서 약 11%, 많게는 19년도 콩 재배지에서 약 30%로 조사되었다.

미기상플럭스 평가를 위한 보조정보로 농작물의 초장, 엽면적지수 등 생육 조사를 수행하였고 플럭스 타워에서 측정된 기온, 강수량, 태양복사에너지 등 환경정보도 수집 분석하였다. 연구 대상지역의 작물에 대한 생육조사는 플럭스 타워가 위치한 농가포장에서 약 2주 간격으로 수행하였다. 작물의 초장은 플럭스 타워가 위치한 농가의 벼와 콩 20주를 고정하여 조사하였다. 벼, 콩 군락의 엽면적 지수(Leaf Area Index, LAI)는 작물체 3주를 채취하여 엽면적측정기(LI-3100C, LI-COR, USA)를 활용하였고, 사과는 3그루를 고정하여 이동형 식생 군락분석기(LAI-2000, LI-COR, USA)를 활용하여 비파괴방식으로 엽면적지수를 조사하였다.

## 결과 및 고찰

### 농업생태계의 $\text{CO}_2$ 플럭스

벼, 콩, 사과 재배지역에 대한 평균적인  $\text{CO}_2$  플럭스의 일 변화량을 살펴보기 위해 30분 누적된  $\text{CO}_2$  순생태계교환량 (Net Ecosystem Exchange, NEE), 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP), 생태호흡량(Re, Ecosystem Respiration)의 1년 자료의 중위수를 일일시계열로 나타내었다(Fig. 1). 벼의 경우, 평균적으로 7시 30분부터 18시까지 GPP가 양의 값을, NEE가 음의 값을 가져, 동시간 동안 작물이 기공을 열고  $\text{CO}_2$ 를 흡수하여 광합성을 하는 것으로 조사되었다. 호흡을 통한  $\text{CO}_2$  교환량은 0.2  $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 일 변동폭(일최고값과 일최소값의 차이)이 적은 것으로 조사되었으며, GPP와 NEE가 4.3  $\text{g C m}^{-2}$ 의 일 변동폭을 가지는 것으

Table 1. Description of three flux tower sites used in this study




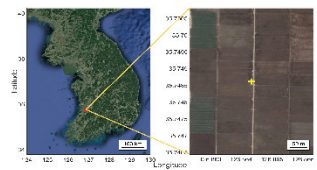
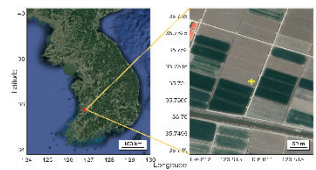
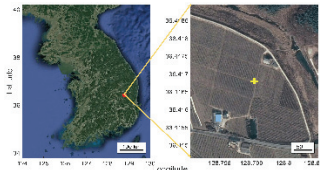
Cultivar (Site Name)	Rice	Bean	Apple
Flux Tower			
Address	Buryang-myeon, Gimje-Si, Republic of Korea	Juksan-myeon, Gimje-Si, Republic of Korea	Oksan-myeon, Uiseong-gun, Republic of Korea
Location	 35°44' 55.30" N, 126°51' 49.94" E	 35°45' 03.80" N, 126°48' 49.2" E	 36°25' 00.60" N, 128°47' 56.60" E
Altitude	6 m	6 m	181 m
Geographical Features	even and flat surface	even and flat surface	even and flat surface
Fetch	600~900 m	150~300 m	200~300 m

Table 2. Meteorological variables observed at flux tower sites

Plant	Variable	Year	Jun	Jul.	Aug.	Sep.	Mean (Sum*)
Rice	Soil Temperature (°C)	2018	21.9	24.9	25.9	21.8	23.7
		2019	21.0	23.3	24.8	21.8	22.7
	Precipitation (mm)	2018	88.5	145.5	247.0	64.5	545.5
		2019	72.0	180.0	119.5	254.0	625.5
	Solar Radiation (MJ/m <sup>2</sup> )	2018	20.2	22.1	19.3	15.8	19.3
		2019	20.3	18.6	20.7	14.4	18.5
Bean	Soil Temperature (°C)	2018	23.4	27.7	29.5	22.6	25.8
		2019	21.8	24.4	25.3	21.8	23.3
	Precipitation (mm)	2018	87.0	146.5	184.0	72.0	489.5
		2019	72.5	165.0	132.0	233.5	603.0
	Solar Radiation (MJ/m <sup>2</sup> )	2018	19.0	21.5	18.9	15.6	18.7
		2019	19.9	16.7	19.1	13.5	17.3
Apple	Soil Temperature (°C)	2018	22.6	26.7	27.3	22.3	24.7
		2019	21.8	24.7	28.0	N.A	24.8
	Precipitation (mm)	2018	58.2	185.8	183.4	93.9	521.3
		2019	98.9	123.8	114.5	133.3	470.5
	Solar Radiation (MJ/m <sup>2</sup> )	2018	19.3	20.6	17.0	13.9	17.7
		2019	20.2	16.7	18.1	13.1	17.0

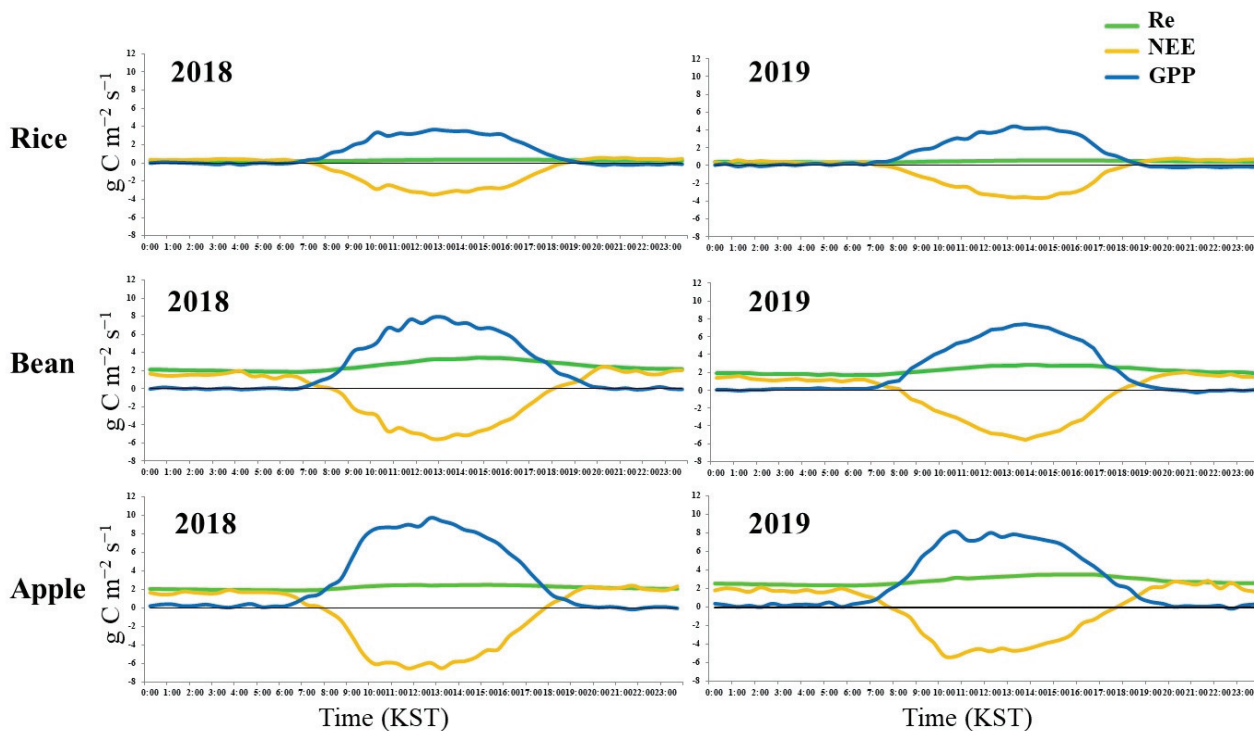


Fig. 1. Diurnal variation of net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (Re), and gross primary production (GPP).

로 조사되었다. 콩은 조사기간 동안 평균 8시 30분부터 17시 30분까지 NEE가 음의 값을 가지는 것으로 조사되었다. 콩의 Re, GPP, NEE의 일 변동폭이 각각 1.3, 7.8, 7.8  $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 으로, NEE가 Re 보다 GPP의 일 변화량에 더 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 사과와 경우, 평균 8시부터 17시 30분까지 음의 NEE값을 가지는 것으로 측정되었다. 2018년 NEE는  $-6.5 \sim 2.4 \text{ g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 범위로 2019년( $-3.6 \sim 0.8 \text{ g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 보다 일 변화가 큰 것으로 조사되었다. 사과의 평균 Re, GPP, NEE의 일 변동폭은 각각 0.4, 7.3, 6.7  $\text{g C m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로, GPP, NEE, Re 순으로 일 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 농업생태계별로 비교하면,  $\text{CO}_2$ 의 일 변화량은 벼가 상대적으로 콩과 사과보다 적은 것으로 추정되었다.

계절 변동성을 살펴보기 위해 일 누적 NEE, GPP, Re의 계절 변화를 살펴보았다(Fig. 2). 벼의 경우, 전체 기간에 대한 평균 NEE는 2018년  $-1.3$ , 2019년  $-2.1 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이었고, 평균 GPP와 Re는 2018년 2.1, 0.7  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ , 2019년 2.7, 0.6  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 조사되었다. 벼 생태계의 이산화탄소 교환량은 벼 재배기간인 6월~9월에 작물과 토양의 호흡에 의해서 많은  $\text{CO}_2$ 가 대기 중으로 방출하였으나, 광합성에 의한 동화작용으로 대기 중의  $\text{CO}_2$ 를 더 많이 흡수하여 재배기간 음의 NEE가 나타난 것으로 평가되었다. 벼 Re, GPP, NEE의 계절 변동폭(월평균 최고값과 월평균 최소값의 차이)는 각각 1.9, 8.2, 6.7  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 으로 추정되었다.

콩 생태계의 경우, 전체 기간에 대한 평균 NEE는 2018년  $-1.8$ , 2019년  $-1.6 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이었고, 평균 GPP와 Re

는 2018년 4.5, 2.8  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ , 2019년 3.9, 2.3  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 조사되었다. 이산화탄소 흡수량은 8월~9월에 가장 컸으며, 다음으로 4월~5월에 큰 것으로 나타났다. 8~9월은 콩 생육에 의한 광합성 동화작용의 영향인 반면, 4~5월은 콩 관측지점 주변의 녹비작물 재배의 영향인 것으로 보인다. 향후 관측 높이를 조절을 통해 관측목표에 부합하도록 취주거리가 확보하거나 품질 검증을 통해 타 작물의 영향을 최소화할 필요가 있다. 콩 Re, GPP, NEE의 계절 변동폭은 각각 5.8, 11.7, 7.2  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 으로 추정되었다.

사과 생태계의 경우, 전체 기간에 대한 평균 NEE는 2018년  $-0.7$ , 2019년  $-0.2 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 이었고, 평균 GPP와 Re는 2018년 3.7, 2.9  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ , 2019년 3.5, 3.3  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 로 조사되었다. 과수는 낙엽과 동시에 시작되는 휴면기(약 11월~3월)를 제외한 기간에 전반적으로  $-1.0$  이상의 음의 NEE값을 가진다. 2년 평균 연 NEE 값은 김제시 논 생태계(벼)에서  $-1.73 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$  ( $-632.0 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )이고, 김제시 밭 생태계(콩)에서  $-1.66 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$  ( $-606.8 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ), 의성군 과수 생태계(사과)에서  $-0.42 \text{ g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$  ( $-152.6 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ )으로 관측되었다. 사과 Re, GPP, NEE의 계절 변동폭은 각각 6.2, 7.4, 2.8  $\text{g C m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 으로 추정되었다.

연평균 음의 NEE는 논, 밭, 과수 생태계 모두가 이산화탄소를 흡수하는 탄소 흡수원임을 의미한다. 특히 논은 연간 NEE가 밭, 과수원 보다 연간  $25.2 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ,  $479.5 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$  보다 많아서 두 지점보다 상대적으로 이산화탄소 흡



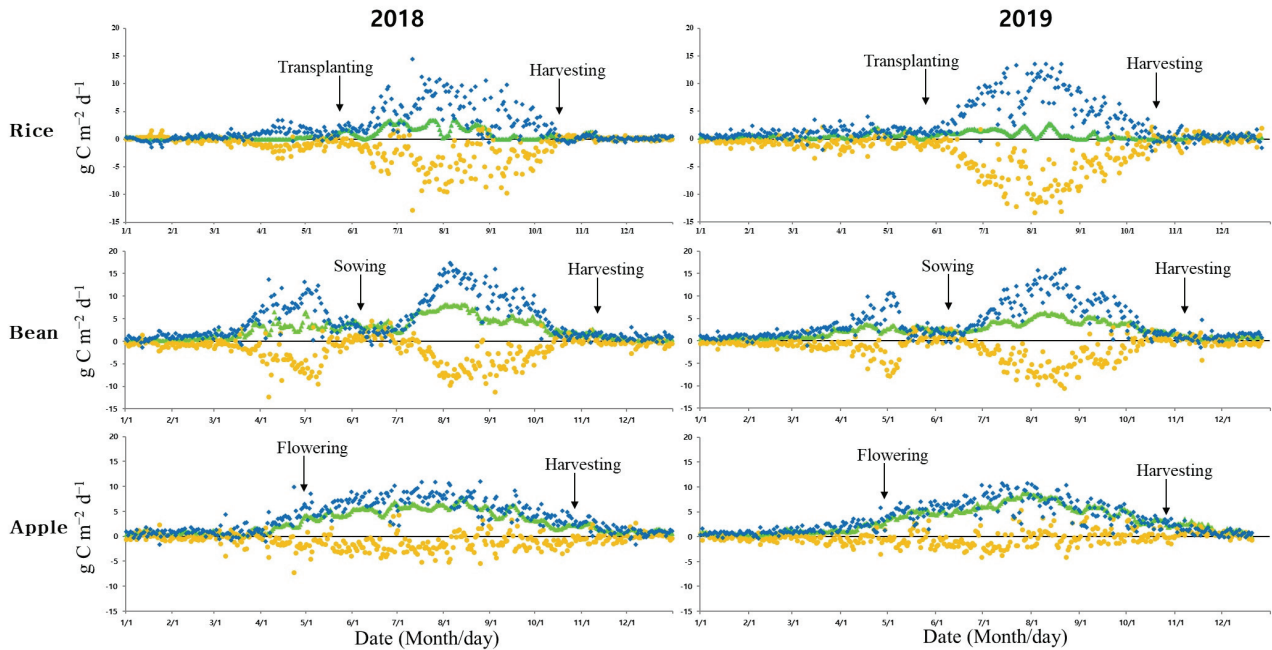


Fig. 2. Seasonal variation of daily integrated net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (Re), and gross primary production (GPP).

수를 많이 하는 것으로 분석되었다. 이는 벼, 콩, 사과가 모두 광합성 과정에서 이산화탄소를 처음 고정할 때 만들어지는 탄소화합물이 탄소 3개인 C3 식물이라도 벼와 같이 엽면적지수가 큰 작물은 성장기간 동안 비교적 광합성 효율이 높기 때문에 NEE가 두 작물보다 높은 것으로 추정된다[5]. 또한 벼는 콩과 사과의 재배 환경조건과는 다르게 관개를 이용함으로써 CO<sub>2</sub> 교환량에 영향을 미치는 것으로 분석된다. 담수는 혐기상태에서 혐기성균에 의해 유기물이 분해되어 CH<sub>4</sub>를 더 많이 발생시킴으로써[13], 이산화탄소 배출량을 상대적으로 적게 발생시키는 요인으로 작용한다. NEE의 계절 변동폭으로 살펴보면, 콩, 벼, 사과 순으로 크게 나타났다. 즉, 사과는 두 작물보다 상대적으로 이산화탄소 교환량의 계절적 변화가 적은 것으로 나타났다.

월 평균 일 Re, GPP, NEE를 농업생태계별로 비교하여 살펴보았다(Fig. 3). 휴면기인 12월~2월 동안은 호흡이 0.1~0.8, 광합성이 0.0~1.0, NEE가 0.1~1.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 차이로 생태계별 큰 차이가 없었다. 벼의 경우, 이앙(5월 중순) 이후 호흡량과 광합성량이 증가하다가 8월 이후 감소한다. NEE 분석 자료에 따르면, 논은 7, 8월에 가장 CO<sub>2</sub>를 많이 흡수하였으며, CO<sub>2</sub> 방출하는 초여름(11월~1월)을 제외한 기간에서 CO<sub>2</sub>를 흡수한 것으로 분석되었다. 콩의 경우, 생육기간이 아닌 3월~5월에도 주변의 녹비작물에 의해 호흡량과 광합성량이 증가하였으며, 음의 NEE값을 가졌다. 6월 콩 파종 후 엽면적이 증가하는 7월부터 호흡량과 광합성량이 증가하고, CO<sub>2</sub> 흡수량이 증가하는 것으로 나타났다. 사과는 개화시기(4월 말~5월 초) 이후 잎 수가 증가하고 엽면적이 커지면서 호흡량과 광합성량이 같이 증가하여 초여름(6월~7월)에 가장 이산화

탄소 흡수를 많이 하는 것으로 분석되었다. 8월 이후 Re와 GPP가 감소하면서 이산화탄소 흡수량이 감소하다가 수확 이후 11월부터는 오히려 탄소를 방출하는 것으로 확인되었다. 농업생태계별로 비교해 보면, 생육기간(6월~9월) 동안 평균 논은 광합성량(5.8 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)이 콩(7.7 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)과 사과(6.8 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>) 보다 적지만 호흡량(1.3 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)이 콩(4.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)과 사과(5.8 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)보다 더 적어서 NEE의 절대값은 논(-4.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)이 콩(-3.1 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)과 사과(-0.9 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>)보다 1.4, 3.6 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 정도 더 큰 것으로 나타났다.

생육기간(6~9월)에 대해 평균된 Re, GPP, NEE를 연도별로 비교하여 살펴보면(Fig. 4), 2019년 논은 2018년과 비교하여 호흡량이 0.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 감소하였고, 광합성량이 1.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 증가하여, NEE가 2.0 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 정도 감소한 것으로 나타났다. 2019년 밭은 2018년과 비교하여 호흡량이 1.1 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 감소하였고, 광합성량이 0.5 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 감소하여, NEE가 0.6 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 정도 감소하였던 것으로 나타났다. 2019년 과수는 2018년과 비교하여 호흡량이 0.7 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 증가하였고, 광합성량이 0.3 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 감소하여, NEE가 1.0 g C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> 정도 증가하였던 것으로 나타났다. 즉 2018년과 비교하여 2019년 생육기간동안 벼는 적게 호흡하고, 많이 광합성하여 더 많이 탄소를 흡수하였으며, 콩은 감소한 광합성량보다 감소한 호흡량이 더 커서 전체적으로 더 많이 탄소를 흡수한 것으로 나타났다. 반면 2019년 사과는 2018년과 비교하여 호흡량은 증가하고 광합성량이 감소하여 전체적인 탄소 흡수량이 감소한 것으로 나타났다.

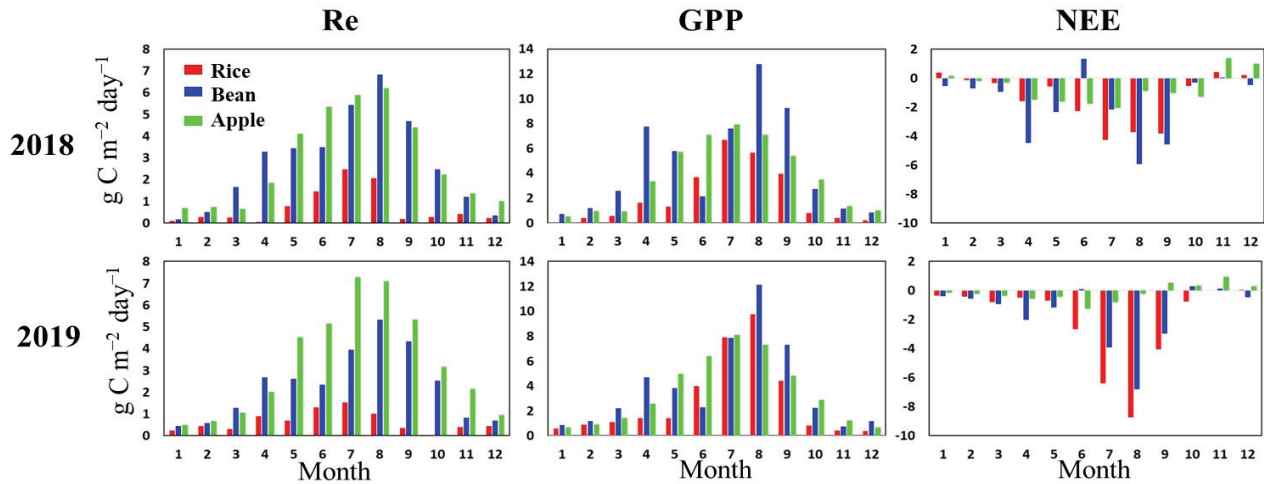


Fig. 3. Monthly mean of daily integrated net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (Re), and gross primary production (GPP).

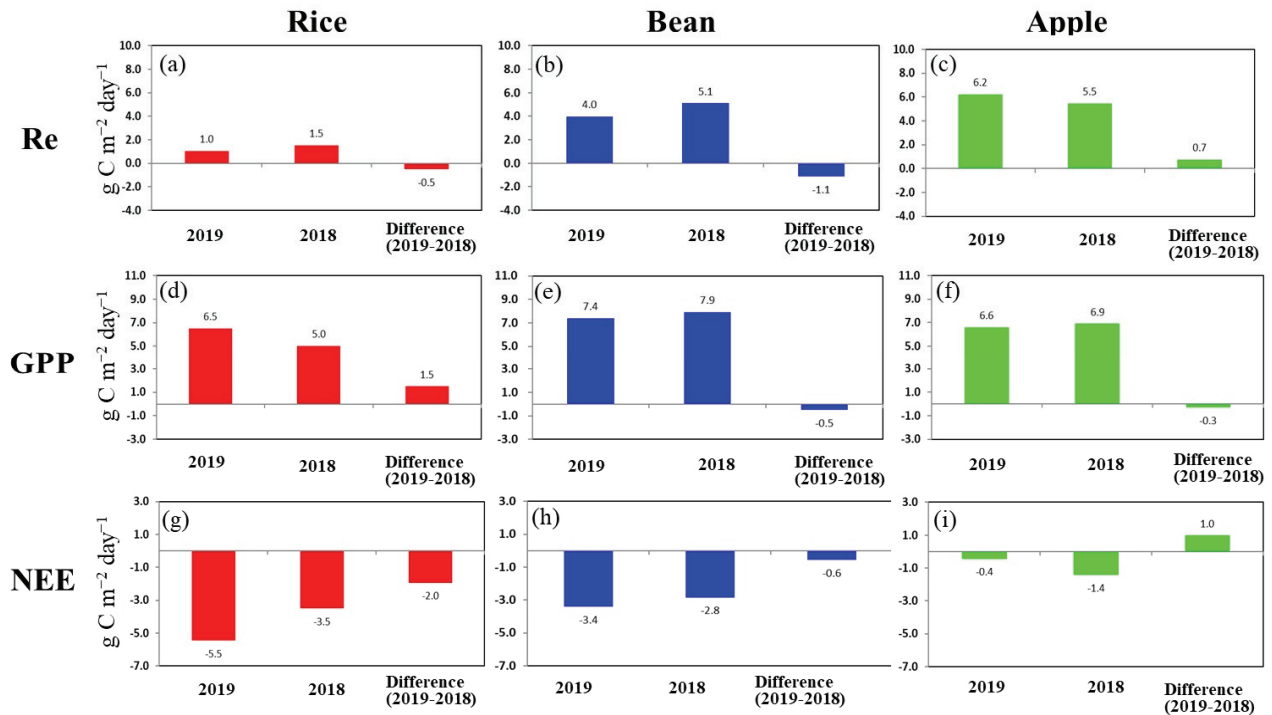


Fig. 4. Differences of net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (Re), and gross primary production (GPP) averaged during the growing season (Jun to September) between 2018 and 2019.

#### 작물의 생육량 및 환경요인

농업생태계별 CO<sub>2</sub> 흡수량의 변화 요인을 분석하기 위해, 벼, 콩, 사과 작물의 초장, 엽면적지수에 대한 생육량 변화를 살펴보았다(Fig. 5). 2019년 벼의 엽면적지수와 초장은 이양일(5월 22일~23일)부터 7월 초순까지 2018년과 비교하여 전반적으로 낮고 작게 나타났으나, 출수기인 8월 중순부터는 2018년보다 엽면적지수는 높아지고 초장은 비슷하거나 약간 커지는 것으로 조사되었다. 2019년도 콩의 엽면적지수는

2018년과 비교하여 파종(6월 3일~5일) 이후 8월 중순까지 높게 나타났으나, 8월 중순 이후 2018년보다 엽면적지수가 낮아지는 것으로 조사되었다. 2019년 콩 초장의 경우 생육기간(6~9월)동안 전반적으로 2018년보다 작은 것으로 나타났다. 2019년도 사과의 엽면적지수는 타 작물에 비해 낮은 변동성을 가졌으며, 생육조사기간인 6월부터 10월까지의 평균 엽면적지수는 2018년과 비교하여 약 59% 정도 적게 나타났다.

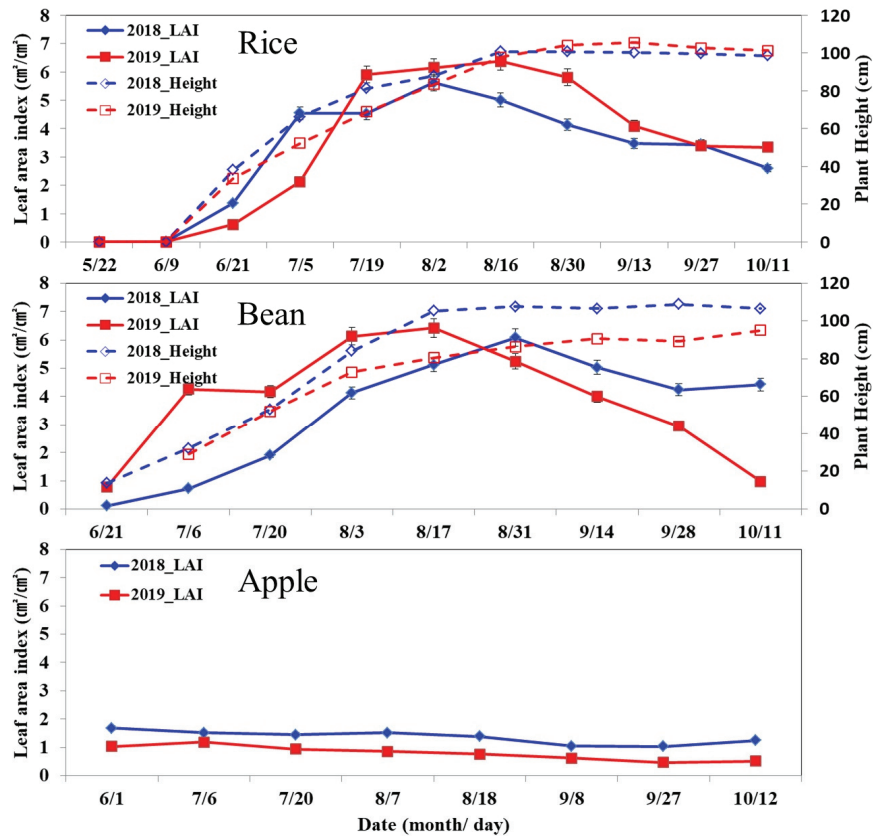


Fig. 5. Seasonal variations of plant height (dashed lines) and leaf area index (LAI, solid lines) in the growing season.

작물의 환경 요인을 분석해 보면, 벼 플럭스 관측지점의 벼 재배기간(6월~9월) 동안의 평균기온은 2018년 23.7°C, 2019년 22.7°C 이었고, 동 기간의 누적강수량은 2018년 545.5 mm, 2019년 625.5 mm로 조사되었으며, 평균 일사량은 2018년 19.3 MJ m<sup>-2</sup>, 2019년 18.5 MJ m<sup>-2</sup>로 관측되었다. 벼 연구사이트에서 2019년은 2018년과 비교하여 6월~8월에는 기온이 낮았고, 7월에는 강수량이 많고 일사량이 적은 반면 8월에는 강수량이 적고 일사량이 많게 관측되었다. 콩 플럭스 연구사이트의 콩 생육기간(6월~9월) 동안의 평균기온은 2018년 25.8°C, 2019년 23.3°C 이었고, 동 기간의 누적강수량은 2018년 489.5 mm, 2019년 603.0 mm로 조사되었으며, 평균 일사량은 2018년 18.7 MJ m<sup>-2</sup>, 2019년 17.3 MJ m<sup>-2</sup>로 관측되었다. 콩 연구사이트에서 2018년 대비 2019년 기온, 강수량, 일사량 변화량이 벼 연구사이트와 유사하게 관측되었다. 사과 플럭스 연구사이트의 과실비대기 기간(6월~9월) 동안의 평균기온은 2018년 24.7°C, 2019년 24.8°C 이었고, 동 기간의 누적강수량은 2018년 521.3 mm, 2019년 470.5 mm로 조사되었으며, 평균 일사량은 2018년 17.7 MJ m<sup>-2</sup>, 2019년 17.0 MJ m<sup>-2</sup>로 관측되었다. 모든 연구사이트에서 2018년은 2019년과 비교하여 7월에는 기온이 높고, 일사량이 많은 조건이었다. 단, 2019년 9월에 사과 플럭스 연구사이트의 기온 센서 교체로 인해 기온은 결측되었다. 담수로 인한

현열의 감소로 벼 플럭스 연구사이트의 기온은 다른 두 사이트보다 낮게 관측되었다. 일반적으로 식생은 온도가 높고 일사량이 많으면 광합성량이 증가하여 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 경향이 강하며, 강수량이 많을수록 광합성량이 감소하고 호흡량이 증가하여 방출하는 경향이 강하다. 그러나 벼, 콩 재배지역에 대해 2019년 7월, 8월의 CO<sub>2</sub> 흡수량(NEE)이 2018년보다 많았는데(Fig. 3), 이는 상대적으로 7월, 8월의 기상보다 7월 중순부터 8월 중순까지 엽면적지수와 관계가 더 많은 것으로 보인다. 또한 사과 재배지역의 경우 생육기간(6월~9월) 강수량이 더 많은 2018년이 2019년보다 CO<sub>2</sub> 흡수량이 많았는데, 이는 엽면적지수의 영향이 더 큰 것으로 보인다. 즉, CO<sub>2</sub> 교환량은 기상과의 직접적인 관계보다 생육 상태와의 관계가 더 긴밀한 것으로 추정된다. 탄소 흡수량 변화에 직접적으로 영향을 미치는 기상, 생육 상황 등 환경 요소들을 밝히기 위해서 향후 추가 연구가 필요하다.

## 결론

본 연구에서는 우리나라 농업생태계별 탄소 수지를 평가하기 위해 전라북도 김제시 논(벼, 신동진) 생태계, 밭(콩, 대창) 생태계, 경상북도 의성군 과수(사과, 후지)에 대해 플럭스 관측시스템을 구축하고, 미기상학적 방식인 에디공분산 방법

으로 2년(2018년~2019년)간 연속적으로 측정된 CO<sub>2</sub> 플럭스 자료를 분석하였다. 또한, 미기상플럭스 평가를 위한 보조정보로 농작물 생육조사를 수행하였으며 여러 가지 기상인자(기온, 강수량, 일사량 등) 등 환경요인 등을 조사하였다.

생육기간(6월~9월) 평균 순 생태계 교환량은 벼가  $-4.5 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 콩이  $-3.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , 사과가  $-0.9 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로 추정되었다. 연구 대상 농경지는 생육기간동안 모두 지역적 육지 탄소 흡수원으로서 기여를 하고 있었으며, 그중에서 논(벼) 생태계가 밭(콩) 생태계와 과수(사과) 생태계보다 보다 더 많이 CO<sub>2</sub>를 흡수한 것으로 분석되었다.

CO<sub>2</sub> 플럭스 교환량은 일별, 계절별, 연도별 변동성을 가짐으로써 작은 시간 규모에 대해 지역적 탄소 수지 변화에 영향을 미친다. 순 생태계 교환량의 일 변화량은 벼가 제일 적고 콩이 가장 컸으며, 계절 변화량은 사과가 제일 적고 콩이 가장 컸다. 연 변화량의 경우, 2019년 벼와 콩은 2018년과 비교하여  $-2.0$ ,  $-0.6 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  만큼 탄소를 더 많이 흡수하였으며, 사과는  $1.0 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$  만큼 적게 흡수하였다. 이러한 연 변화는 기상과의 직접적인 관계보다 생육 상태와의 관계가 더 긴밀한 것으로 추정된다.

이 연구결과는 다양한 농경지에 대한 탄소 수지를 정량화함으로써 농경지가 이산화탄소 흡수원으로서 역할을 증명할 수 있는 근거자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 작은 모자이크 형태의 논, 밭으로 이루어진 우리나라에 대한 생지화학 및 지역 기후 모델의 기초자료로 모사 능력 개선을 위해 이용될 수 있다. 그러나 본 연구는 특정 대상 지역에 대한 2년 관측 자료를 기반으로 하고 있어 자료의 대표성과 신뢰성을 얻기 위해서는 장기적인 관측 및 모니터링이 필요하며, 주변의 다른 작물과 인접한 토지이용 형태, 지형 등의 영향을 최소화할 수 있도록 좀 더 정밀한 탄소 수지 추정이 필요하다. 또한 추가적인 분석을 통해 탄소 수지의 시공간적 변동성 패턴 및 원인을 추정할 수 있다면, 기후 변화 대응 및 적응을 위한 중요 정보로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## Note

The authors declare no conflict of interest.

## Acknowledgement

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01489201)", National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## References

1. IPCC (2014) Climate change (2014) synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the

- fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core writing team, (eds.) Pachauri RK, Meyer LA]. P. 151, IPCC, Geneva, Switzerland.
2. Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA, Haberl H, Harper R, House J et al. (2014) Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). Climate change 2014: mitigation of climate change (eds. Edenhofer O et al.), pp. 811-922. Cambridge University Press, UK.
3. Gray JM, Frohking S, Kort EA, Ray DK, Kucharik CJ, Ramankutty N, and Friedl MA (2014) Direct human influence on atmospheric CO<sub>2</sub> seasonality from increased cropland productivity. *Nature*, 515, 398-401. <https://doi.org/10.1038/nature13957>.
4. Zeng N, Zhao F, Collatz GJ, Kalnay E, Salawitch RJ, West TO, and Guanter L (2014) Agricultural green revolution as a driver of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal amplitude. *Nature*, 515, 394-397. <https://doi.org/10.1038/nature13893>.
5. Lee B, Kang W, Kim CK, Kim G, Lee CH (2017) Estimating carbon uptake in forest and agricultural ecosystems of Korea and other countries using eddy covariance flux data. *Journal Environmental Impact Assess*, 26(2), 127-139.
6. Shim KM, Min SH, Kim YS, Jung MP, Choi IT, Kang KK (2016) Comparison of carbon budget between rice-barley double cropping and rice mono cropping field in Gimje, South Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 18(4), 337-347.
7. Min SH, Shim KM, Kim YS, Jung MP (2013) Seasonal variation of carbon dioxide and energy fluxes during the rice cropping season at rice-barley double cropping paddy field of Gimje. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 15(4), 273-281.
8. Wilczak JM, Oncley ST, and Stage ST (2001) Sonic anemometer tilts correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127-150.
9. Webb EK, Pearman GI, and Leuning R (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 106, 85-100.
10. Isaac P, Cleverly J, McHugh I, Van Gorsel E, Ewenz C, Beringer J (2017) OzFlux Data: Network integration from collection to curation. *Biogeosciences*, 14(12), 2903-2928. <https://doi.org/10.5194/bg-14-2903-2017>.
11. Hong JH, Kwon J, Lim JH, Byun YH, Lee J, Kim J (2009) Standardization of koflux eddy-covariance data processing. *Korean journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11(1), 19-26.



12. Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T et al. (2005) On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424-1439.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>.
13. Kim GY, Lee JS, Lee SI, Jeong HC, Choi EJ, Na US (2017) Evaluation of carbon balance for carbon sink/emission with different treatments in paddy field. *Korean Journal of Environmental Biology*, 35(4), 715-725. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2017.35.4.715>.