한국농림기상학회지, 제15권 제4호(2013) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 15, No. 4, (2013), pp. 273~281
DOI: 10.5532/KJAFM.2013.15.4.273
ⓒ Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.

김제 벼-보리 이모작 논에서 벼 재배기간동안의 CO_2 및 에너지 플럭스의 계절적 변화

민성현 · 심교문* · 김용석 · 정명표 · 김석철 · 소규호
국립농업과학원
(2013년 10월 21일 접수; 2013년 11월 11일 수정; 2013년 12월 20일 수락)

Seasonal Variation of Carbon Dioxide and Energy Fluxes During the Rice Cropping Season at Rice-barley Double Cropping Paddy Field of Gimje

Sung-Hyun Min, Kyo-Moon Shim*, Yong-Seok Kim, Myung-Pyo Jung, Seok-Cheal Kim and Kyu-Ho So
National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea
(Received October 21, 2013; Revised November 11, 2013; Accepted December 20, 2013)

ABSTRACT

Based on the results of continuous flux measurements at the Gimje paddy flux site in the southwestern coast of Korea, carbon dioxide and energy exchanges between customarily cultivated rice-barley double cropping paddy field and the atmosphere during the 2012 rice growing season (from 9th Jun. 2012 through 20th Oct. 2012) were analyzed. Carbon dioxide and energy (H, LE) fluxes were estimated by the eddy covariance method. Environmental parameters (net radiation, precipitation, *etc.*) and plant biomass (LAI, plant height, *etc.*) were measured along with fluxes. After the quality control and gap-filling, the observed fluxes were analyzed. The results have been showed that net ecosystem exchange (NEE), gross primary production (GPP), and ecosystem respiration (Re) during the rice cropping period were -277.1, 710.3, and 433.2 g C m^{-2}, respectively.

***Key words*: Ecosystem respiration (Re), Eddy covariance method, Gross primary production (GPP), Net ecosystem exchange (NEE), Rice paddy**

I. 서 론

육상생태계와 대기간의 CO_2 교환은 대기의 CO_2 농도에 영향을 주는 주요한 과정중에 하나이다. 전 지구적인 CO_2 수지에서 육상생태계의 역할을 평가하고, 지구온난화에 따른 미래의 CO_2 수지를 예측하기 위해서, 세계 각국의 다양한 생태계에서 CO_2 교환에 대한 장기적인 관측이 진행되고 있다(Frank and Dugas, 2001; Saigusa *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2002). 이러한 관측사이트는 대개 산림생태계에 위치해 있는데, 그 이유는 산림생태계가 전 지구의 CO_2 수지에 가장 큰 영향을 준다고 믿기 때문이다(Beer *et al.*, 2010). 하지만, 육상생태계 중에 초지 · 습지 · 농경지 같은 비산림생태계도 육지의 상당한 부분를 차지하고 있고, 지역 및 전 지구적 CO_2 수지에 큰 역할을 하고 있다(Saito *et al.*, 2005).

* Corresponding Author : Kyo-Moon Shim
(kmshim@korea.kr)

벼 작물은 아시아의 주요 곡물이고, 아시아의 벼논 면적은 전 세계의 벼 재배면적의 약 87%를 차지하고 있다(FAO, 2004). 벼는 다양한 기후(열대에서 온대)·토양·생물 조건에서 재배되고 있고, 영농방법(시비, 물관리 등)도 다양하기 때문에, CO_2와 CH_4의 교환량이 조사 지역에 따라 다르게 나타날 수 있다(Tseng *et al.*, 2010). 따라서, 육상생태계의 CO_2 수지에서 벼논 생태계의 역할을 평가하거나, 미래의 CO_2 수지를 예측하기 위해서는 여러 지역의 다양한 논 생태계에서 CO_2 교환량을 정량화할 필요성이 있다.

1950년대와 1960년대에는 전통적인 미기상학적 방법(공기역학과 보웬비)을 활용하여 벼 논에서의 CO_2 교환량과 에너지 수지에 대한 연구가 활발히 수행되었고(Uchijuma *et al.*, 1976), 1980년대 이후부터는 고속 반응 CO_2 분석기의 개발로, 벼 군락위의 CO_2 플럭스를 에디공분산 기법으로 측정하였다. 아시아 국가 중에는 일본(Miyata *et al.*, 2000; Saito *et al.*, 2005), 중국(Ren *et al.*, 2007), 방글라데시(Hossen *et al.*, 2011), 필리핀(Alberto *et al.*, 2009), 대만(Tseng *et al.*, 2010) 등에서 관개와 담수 혹은 호기성 논 생태계에서의 계절적 혹은 연간 CO_2 플럭스의 변화량을 측정하였다. 국내에서도 벼 단작의 논 생태계를 대상으로 CO_2와 에너지의 교환량을 관측하여 보고하였으나(Moon *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2005), 일본, 중국 등 아시아의 다른 국가보다는 연구빈도와 연구결과가 다소 미흡한 실정이다.

아시아에서 논 생태계는 CO_2와 CH_4와 같은 온실가스의 전 지구적 수지에 중요한 역할을 하고 있지만, 아직 논 생태계의 CO_2의 순 플럭스량에 대해서는 상당한 불확실성이 존재한다(Bhattacharyya *et al.*, 2013). 앞으로 2030년에는 전 지구의 벼 재배면적이 현재보다 4.5%까지 증가한다고 예측되고 있으므로(FAO, 2003), 변화되는 기후시나리오에 대응하여, 논 생태계의 CO_2 플럭스 잠재량의 불확실성을 줄이기 위한 지역수준의 요인분석 등 상세한 연구가 필요하다(Bhattacharyya *et al.*, 2013).

본 연구에서는 전북 김제시 부량면 신용리의 벼-보리 이모작 논에서 장기적으로 운영되고 있는 논 생태계의 플럭스 관측시스템을 소개하고, 2012년 벼 재배기간동안에 관측된 CO_2 및 에너지 플럭스를 다양한 보정단계와 결측보충 과정을 거친 후, 논 생태계와 대기간의 CO_2 교환량을 정량화하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 지역

연구지역(35°44'N, 126°51'E, 21m(해발고도))은 전라북도 김제시 부량면 신용리 일대의 논 생태계로, 벼

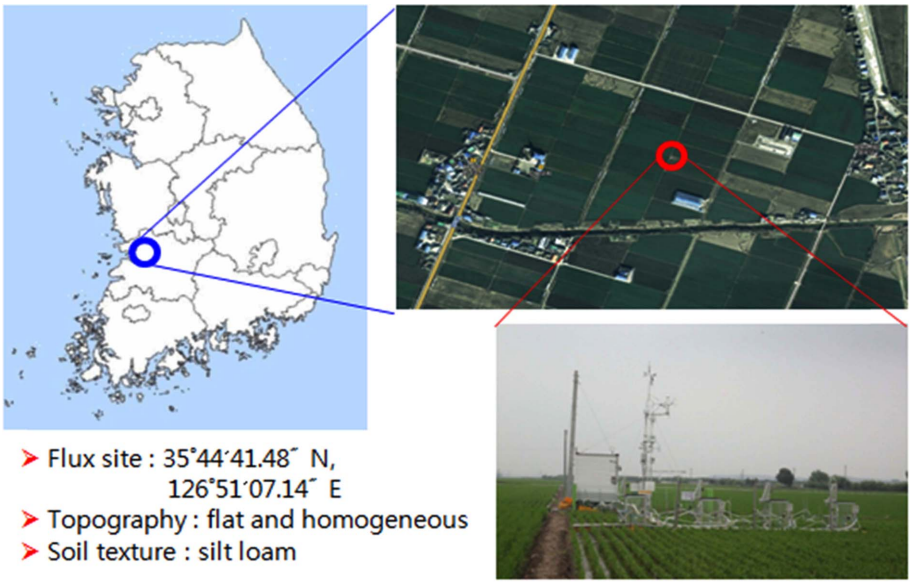

Fig. 1. Map of the southern part of Korean peninsular and the location of eddy covarian system installed at Gimje, Korea.

-보리 이모작 작부체계가 적용되고 있다. 관측장소의 취주거리(fetch)는 150~300m 범위이며, 관측장소에서 남서쪽 방향으로 400m 떨어진 곳에 소규모 농촌 마을이 위치해 있고, 서쪽방향으로 350m 떨어진 곳에 교통량이 다소 적은 지방도로가 위치해 있다(Fig. 1). 토양통은 물빠짐이 좋은 미사질양토의 전북통으로, 표토의 유기물 함량은 32.3g C kg^{-1}이고, pH (water)는 5.6이며, 탄소와 질소함량은 각각 18.6g C kg^{-1}와 1.9g N kg^{-1}이다. 벼 작물을 기준으로 구분한 19개 농업기후지대 중에 차령남부평야지대에 속하며(Choi and Yun, 1989), 남부서안형 기후로 겨울에는 북서계절풍이 강하고, 여름에는 온난・습윤하다. 또한, 바다의 영향으로 내륙에 비해 겨울철 기온은 높고 여름철 기온은 낮아서 연교차가 적다.

2.2. 영농 활동

보리 수확 후(2012년 6월 8일), 벼 재배를 위한 논물대기(6월 9일)와 논갈이(6월 10일)를 진행했으며, 비료는 밑거름으로 맞춤16호(남해화학)를 헥타르당 500kg(질소기준 110kg ha^{-1})를 시비했고(6월 16일), 이삭거름으로 요소를 헥타르당 75kg(질소기준 35kg ha^{-1})를 시비했다(8월 19일). 벼 품종은 중만생종인 신동진벼이고, 어린모 기계이앙방식으로 이앙했다(6월 21일). 벼 출수기는 8월 18일로 조사되었고, 벼 수확날짜는 10월 20일이었다(Table 1).

2.3. 생육조사 및 생육단계 구분

벼 생육조사는 플럭스 관측시스템의 서쪽방향에 위치한 농가포장에서 약 2주 간격으로 수행하였다. 벼 작물의 초장과 분얼수(경수)는 벼 20주를 고정하여 조사하였고, 벼 군락의 엽면적지수(LAI)는 이동형 식생 군락분석기(LAI-2000, LI-COR Biosciences Inc., USA)를 활용하여 비파괴방식으로 조사하였다. 벼 20주의 현장조사로 파악된 벼 작물의 생육량(초장, 분얼수)과 유사한 벼 작물체 5주를 채취하여, 실험실에서 작물체의 생체중 및 건물중을 지상부(엽초, 엽신, 이삭)와 지하부(뿌리)로 나누어 부위별로 세부적으로 분석하였다. 플럭스 관측 타워의 3m 높이에 디지털카메라를 서쪽방향으로 설치하여, 1시간 간격으로 벼 작물의 생육상황과 농가포장의 영농활동을 감시하였고, 이를 토대로 벼 재배기간을 총 5단계로 구분하여 논 생태계의 플럭스 분석에 활용하였다(Table 2).

Table 1. Field management of the study site in 2012

Event	Date or period
Flooding	9 June
Plowing	10 June
Basal fertilization	16 June
Transplanting	21 June
Mid-summer drainage	21 July ~ 15 August
Heading	18 August
Supplemental fertilization	19 August
Flooding	16 August ~ 14 September
Pre-harvest drainage	15 September
Harvest	20 October

Table 2. Classification of growth stage of rice in 2012

Stage	Period
Pre-transplanting (I)	9 June ~ 20 June
Rooting (II)	21 June ~ 28 June
Tillering (III)	29 June ~ 25 July
Elongation (IV)	26 July ~ 18 August
Ripening (V)	19 August ~ 20 Octocber

2.4. 물리량(CO_2 등) 플럭스 측정

미기상학적 방법인 에디공분산법으로 벼논 생태계의 지표와 대기간에 교환되는 기체(CO_2, H_2O)와 에너지(현열, 잠열) 등의 물리량 플럭스를 정량화하였다. 즉, 대기 중의 CO_2와 H_2O는 개방형 CO_2/H_2O 적외선 가스분석기(LI-7500, LI-COR Biosciences Inc., USA)로, 대기 중의 풍속과 온도는 3차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)로 초당 10회(10Hz)씩 측정하였고(Table 3), 이들 데이터(풍속, 바람에 수송된 대기 중의 CO_2 농도・H_2O 농도・온도)의 30분 평균에 대한 편차를 공분산하여 30분 평균 물리량 플럭스를 계산하였다. 예를 들어, CO_2 플럭스 계산식은 다음과 같다(식 1).

$$F = \rho\overline{w'x'} \quad (1)$$

여기서 ρ는 공기의 밀도(kg m^{-3}), '–'는 시간 평균, w는 연직풍속(m s^{-1}), x는 혼합비(g m^{-3}/kg m^{-3}), 즉 건조공기의 밀도에 대한 기체의 밀도, ' ′'는 평균으로부터의 변동을 의미한다.

10Hz의 물리량 플럭스 원본자료와 30분 플럭스 평균자료는 자료집록기(CR5000, Campbell Scientific

Table 3. The instruments, measurement variables and height (depth)

Instruments	Quanity	Measurement variables	Measurement height (depth)
CSAT	1	Wind speed and air temperature	3 m
LI-7500	1	CO_2 and H_2O density	3 m
CNR1	1	Net radiation, incoming/outcoming short- and long-wave radiation	1.25 m
HMP45C	2	Air temperature and relative humidity	1 m, 2 m
HPF1	2	Soil heat flux	0.1 m
TCAV	2	Soil temperature	0.1 m
CS616	2	Soil water content	0.1 m
CR5000	1		1 m

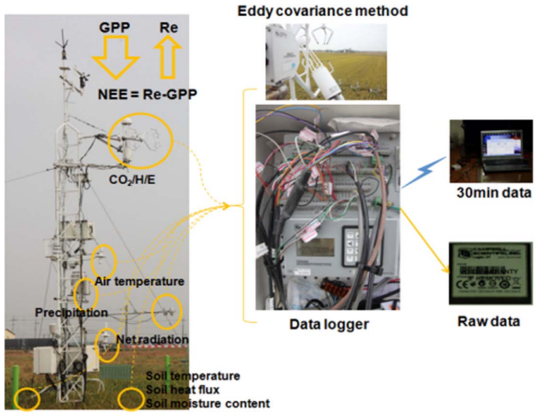

Fig. 2. Eddy covariance system for CO_2 flux measurement and data flow diagram.

Inc., USA)에 저장되며, CDMA 통신 모뎀을 이용하여 30분 평균자료를 실시간으로 수집했다. 또한 2주 간격으로 현장에서 메모리카드를 교체하는 방식으로 10Hz 플럭스 원본자료를 수집했다(Fig. 2).

2.5. 환경인자 측정

순복사 센서(CNR1, Kipp&Zone B.V., The Netherlands)를 이용하여, 태양복사의 입사량과 반사량, 그리고 지구복사의 입사량과 방출량를 측정하였고, 자료집록기의 내부연산에 의해서 순복사와 알베도를 산출하였다. 지중열류량 센서(HFP1, Campbell scientific, Inc., USA)는 관측타워의 서쪽과 동쪽에 각각 하나씩 총 2개를 지중 10cm 깊이에 설치하여 지표면과 땅속의 열 이동량을 측정하였다. 온·습도 센서(HMP45C, Campbell scientific, Inc., USA)를 관측타워의 1m와 2m 높이에 각각 설치하여, 벼 군락의 상·하단의 온도와 습도를 측정하였다. 또한, 토양수분(CS616, Campbell scientific, Inc., USA)과 토양온도 센서(TCAV, Campbell scientific, Inc., USA)를 관측타워의 동쪽과 서쪽의 지중 10cm 깊이에 하나씩 총 2개를 설치하여 토양의 수분과 온도의 변화를 측정하였다. 이들 환경인자들은 5초 간격으로 측정되고, 자료집록기에는 30분 평균자료가 저장되며, CDMA 통신 모뎀을 통해서 실시간으로 수집하였다. 그리고, 2주 간격으로 현장 방문시 수동으로도 수집하였다(Fig. 2; Table 3).

2.6. 플럭스 자료의 처리

미기상학적 에디공분산법으로 측정 및 계산된 30분 평균 플럭스자료는 KoFlux의 표준화 프로그램에 따라 처리 과정을 수행하였다. Lee *et al.*(2004)와 Wilczak *et al.*(2001)이 제시한 평면 맞추기 회전(PFR; planar fit rotaion)과 Webb *et al.*(1980)이 제시한 공기 밀

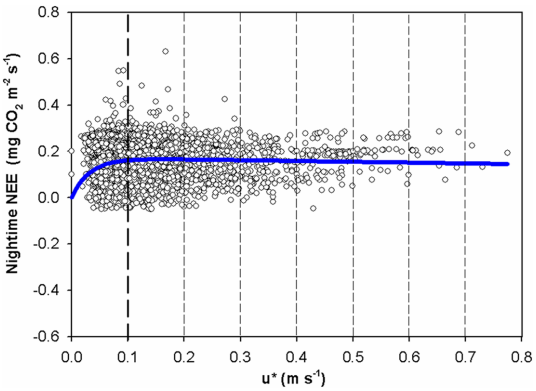

Fig. 3. Determination of the threshold friction velocity (u*) during the growing season (from 9th June through 20th October) in 2012. The solid line represents a smoothed function fitted to the data. The dashed line represents the threshold below which the flux is lower. The *u** threshold for the site is 0.1 m s^{-1}.

도 변동 보정을 수행하였으며, 불확실성을 감소시키기 위해서 FLUXNET의 표준 방법인 연속된 3개의 관측값의 차이를 이용한 튀는 자료 찾기 방법을 이용하였다(Papale *et al.*, 2006). 에디공분산의 경우 플럭스를 관측할만한 난류가 존재해야 하는데, 야간의 CO_2 플러스는 이런 조건을 만족시키지 못하는 경우가 많으므로, 야간 CO_2 플럭스에 대한 마찰 속도(u^*)의 임계점을 산출해야 한다. 본 연구사이트의 CO_2 플럭스와 마찰 속도의 임계점은 0.1m s^{-1}로 설정했으며(Fig. 3), 임계점 이하의 야간 CO_2 플럭스는 분석에서 제거하였다. 결측보충(gap-filling) 과정으로는 FLUXNET의 표준화 방법인 수정된 색인 목록 방법을 이용하였는데(Reichstein *et al.*, 2005), 본 연구에서는 벼 생육기간의 CO_2 플럭스의 결측보충률이 약 41%로 조사되었다.

2.7. CO_2 플럭스의 분배 (NEE, GPP, Re)

벼 군락과 대기권 사이의 CO_2의 순생태계 교환량(net ecosystem exchange, NEE)은 벼 작물의 광합성 동화작용에 의한 CO_2 흡수량(gross primary production, GPP)과 작물체 및 토양의 호흡에 의한 CO_2 배출량(ecosystem respiration, Re)의 차이로 나타낼수 있다(식 2).

$$F_{NEE} = F_{Re} - F_{GPP} \quad (2)$$

Re는 작물 및 토양의 주간호흡과 야간호흡의 합으로 나타낼 수 있는데, 야간호흡량은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$F_{Re}(N) = Aexp(BT) \quad (3)$$

여기서, A와 B는 회귀분석에 의해 결정된 경험상수이며, B는 온도계수(Q_{10})로 $In(Q_{10})/10$으로 나타내고, A는 야간지온이 0°C일 때의 호흡량을 의미한다.

주간의 지온에 대한 생태학적 호흡량의 관계는 야간호흡과 같다는 전제하에, 야간호흡의 계산식(식 3)에 주간의 지온을 대입하여 주간호흡량을 계산하였다(Saito *et al.*, 2005).

III. 결 과

3.1. 벼 작물의 생육량 변화

벼 작물의 생육량 변화를 시계열로 나타내면, 그림 5와 같다. 벼 작물의 분얼수는 착근단계(II)부터 분얼단계(III)까지 단위면적(m^2)당 258.8개에서 835.5개로 크게 증가되었으나, 신장단계(IV)부터 감소하여 수확기에는 311.1개로 조사되었다. 벼 작물의 초장은 착근단계에서 분얼단계까지 15.6cm에서 55.4cm로 서서히 늘다가, 신장단계를 거쳐 성숙단계(V) 중반에는 95.4cm까지 크게 증가한 후, 수확기까지 조금 줄어드

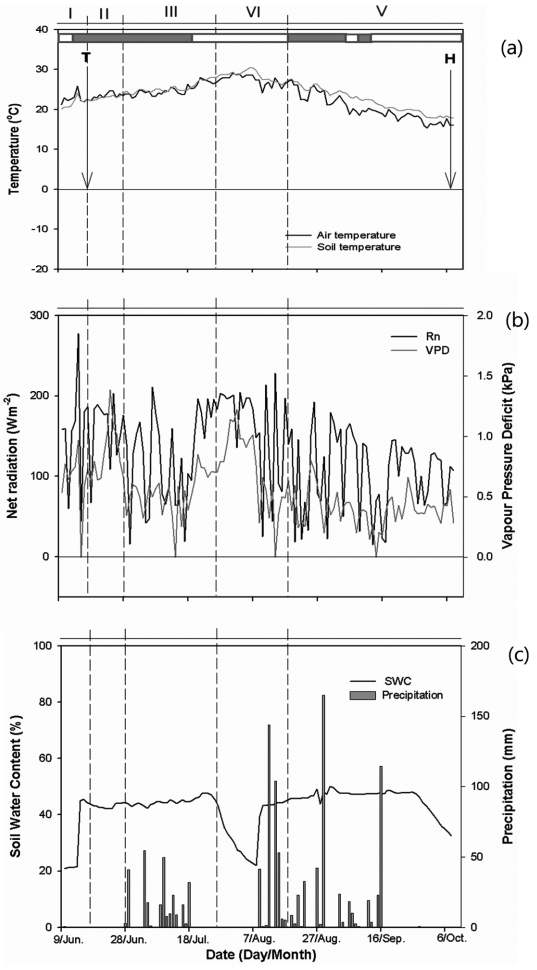

Fig. 4. Seasonal variations of meteorological variables (air temperature, etc.) at a Gimje paddy flux site during the growing period in 2012. The dashed vertical lines show the different growth stages of the rice. The shading of the horizontal bar at the top denotes flooded (grey) and dry (white) soil conditions. T and H mean transplating and harvest, respectively. Seasonal variations of meteorological variables (air temperature, etc.) at a Gimje paddy flux site during the growing period in 2012. The dashed vertical lines show the different growth stages of the rice. The shading of the horizontal bar at the top denotes flooded (grey) and dry (white) soil conditions. T and H mean transplating and harvest, respectively.

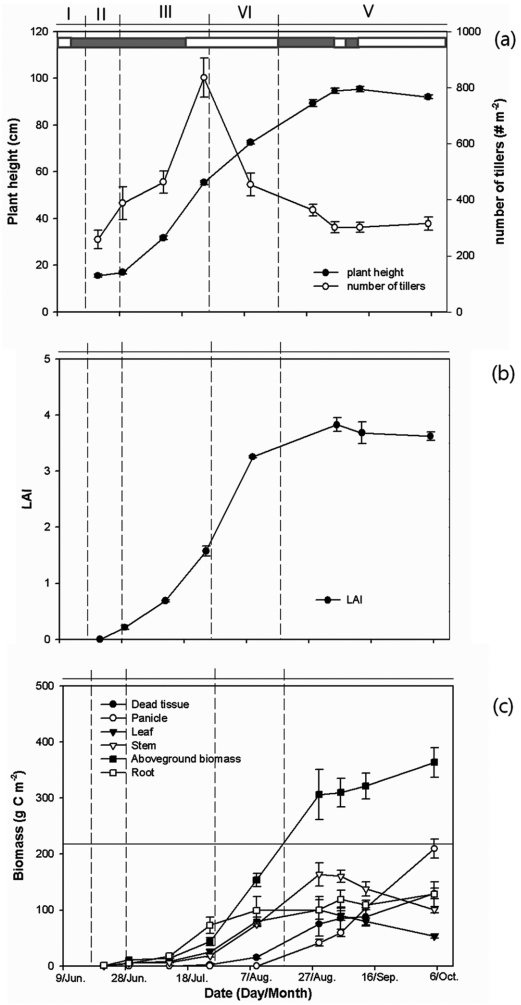

Fig. 5. Seasonal variations of rice biomass in the 2012 growing season, showing (a) number of tillers and height, (b) leat area index, and (c) carbon content of biomass. The dashed vertical lines show the different growth stages of the rice. The shading of the horizontal bar at the top denotes flooded (grey) and dry (white) soil conditions.

는 양상을 나타냈고, 엽면적 지수(LAI)는 성숙단계 중반에 3.9로 가장 높았다가 그후 낮아져서 수확기에는 3.3으로 조사되었다. 벼 작물의 지상부 총 건물중은 신장단계부터 급속히 증가하는 것으로 조사되었고, 지하부 건물중(뿌리)은 분얼단계까지는 급속히 증가한 후 신장단계부터는 서서히 증가하는 것으로 조사되었다.

3.2. 벼논 생태계의 환경요인 변화

플럭스 연구사이트의 벼 재배기간 동안의 평균기온은 22.1℃ 이었고, 평균 순복사에너지는 123.6 Wm^{-2}로 조사되었다. 또한, 동 기간의 누적강수량은 1,138mm이었고, 강수일수는 53일이었는데, 태풍 '볼라벤'와 '덴빈'이 영향을 미친 8월 하순과 9월 중순에 많은 강수량이 관측되었다. 벼 논에서의 토양수분은 담수여부에 따라 크게 변화되었는데, 본 연구에서는 벼 재배기간동안의 지중 10cm 깊이의 토양수분이 평

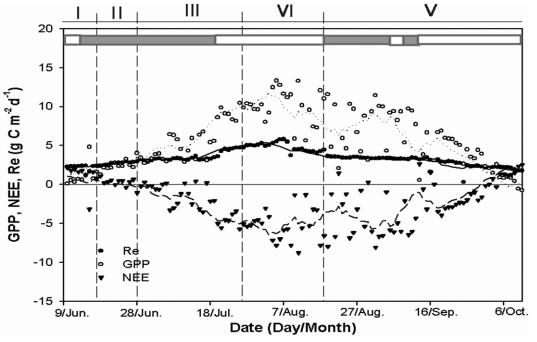

Fig. 6. Seasonal variations of daily gross primary production (GPP), ecosystem respiraion (Re), and net ecosystem exchange (NEE) in the 2012 growing season. The dashed vertical lines show the different growth stages of the rice. The shading of the horizontal bar at the top denotes flooded (grey) and dry (white) soil conditions.

Table 4. Daily averaged CO_2 and energy fluxes for five stages during the 2012 rice cultivation period

Stage	CO_2 flux (g C m^{-2} d^{-1})			Energy flux (MJ m^{-2} d^{-1})	
	NEE	GPP	Re	LE	H
Pre-transplanting(I)	0.9 ± 0.4	1.4 ± 0.4	2.3 ± 0.0	11.2 ± 1.0	2.3 ± 0.1
Rooting(II)	0.1 ± 0.2	2.7 ± 0.2	2.8 ± 0.0	13.0 ± 0.5	1.0 ± 0.1
Tillering(III)	-1.9 ± 0.4	5.4 ± 0.4	3.5 ± 0.1	8.7 ± 0.7	0.5 ± 0.1
Elongation(IV)	-5.3 ± 0.4	10.1 ± 0.4	4.8 ± 0.1	12.5 ± 1.0	0.4 ± 0.1
Ripening(V)	-1.7 ± 0.4	4.5 ± 0.5	2.8 ± 0.1	6.9 ± 0.5	0.5 ± 0.1
Total period	-2.1 ± 0.3	5.3 ± 0.3	3.2 ± 0.1	9.0 ± 0.2	0.7 ± 0.1

NEE, GPP, Re, LE, and H mean net ecosystem exchange, gross primary production, ecosystem respiration, latent heat, and sensible heat, respectively

Table 5. Cumulated CO_2 and energy fluxes for five stages during the 2012 rice cultivation period

Stage	CO_2 flux (g C m^{-2})			Energy flux (MJ m^{-2})	
	NEE	GPP	Re	LE	H
Pre-transplanting(I)	11.3	16.3	27.6	134.3	27.9
Rooting(II)	1.0	21.6	22.6	103.9	8.1
Tillering(III)	-52.2	146.5	94.2	234.5	13.6
Elongation(IV)	-127.4	243.1	115.7	299.2	9.2
Ripening(V)	-109.7	282.7	173.0	431.7	29.9
Total period	-277.1	710.3	433.2	1203.5	88.7

NEE, GPP, Re, LE, and H mean net ecosystem exchange, gross primary production, ecosystem respiration, latent heat, and sensible heat, respectively

균 42%로 관측되었다(Fig. 4).

3.2. 벼 논생태계의 CO_2 플럭스의 계절적 변화

벼 재배기간 동안의 NEE는 단위면적당(m^2) +4.4 ~ -8.8g C d^{-1} 범위로 측정되었다(Fig. 6). 평균 NEE는 단위면적당 -2.1g C d^{-1} 이었고, 평균 GPP와 Re는 각각 5.3와 3.2g C d^{-1}로 조사되었다(Table 4). 이들 수치에 총 벼 재배기간(134일)을 곱한 누적 NEE와 GPP 및 Re는 각각 단위면적당 -277.8, 710.3, 433.2g C로 분석되었다(Table 5). CO_2 플럭스를 벼 생육단계별로 구분하여 분석하면, NEE는 신장단계(IV, -5.3g C m^{-2} d^{-1})에서 가장 많은 CO_2가 흡수되었고, 다음으로 분얼단계(III, -1.9), 성숙단계(V, -1.7) 순으로 많이 흡수된 반면에, 이앙전단계(I, +0.9)와 착근단계(II, +0.1)에서는 CO_2가 방출되는 것으로 분석되었다(Table 4).

GPP는 신장단계에서 광합성에 의해 동화작용으로 대기중의 CO_2를 가장 많이 고정하였고, 다음으로 분얼단계, 성숙단계, 착근단계 순으로 많았으며, 이앙전단계에서는 가장 적은 CO_2를 고정하는 것으로 평가되었다. 하지만, Re는 신장단계에서 작물과 토양의 호흡에 의해서 가장 많은 CO_2를 대기중으로 방출하는 것으로 평가되었다(Table 4).

3.3. 벼논 생태계의 에너지 플럭스의 계절적 변화

벼 재배기간의 에너지(현열, 잠열) 플럭스의 계절적 변화는 Fig. 7과 같다. 벼논은 이앙전단계(I)부터 분얼단계(III)까지의 대부분의 기간은 담수상태로, 동 기간 동안에는 잠열(LE)이 점차 증가하다가 장마기간에는 강우현상으로 잠열이 급속히 낮아진 후, 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 반면에, 동 기간의 현열(H)은 착근단계까지 낮아진 후, 일정하게 유지되는 경향을 나타냈으며, 신장단계(IV)의 대부분의 기간은 벼 논이 배수상태로, 잠열이 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 성숙단계(V)의 전반에는 벼 논이 강우현상에 의한 담수상태로 잠열이 증가하였으나, 그 후로 감소하는 경향이었고, 성숙단계동안의 현열은 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

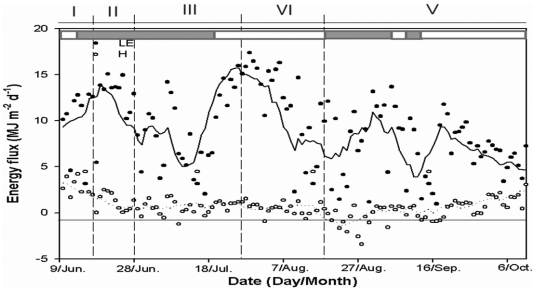

Fig. 7. Seasonal variations of daily sensible heat flux (H) and latent heat flux (LE) in the 2012 growing season. The dashed vertical lines show the different growth stages of the rice. The shading of the horizontal bar at the top denotes flooded (grey) and dry (white) soil conditions.

3.4. 벼 작물 생육량과 벼논 생태계의 CO_2 플럭스의 관계

벼 재배기간의 벼 작물 생육량(지상부와 지하부 생육량의 합)과 벼논 생태계의 NEE는 유의성 높은 선형관계를 나타냈다(Fig. 8). 즉 벼 작물 생육량이 증가함에 따라 NEE(r^2=0.98, n=10, $p<0.001$)의 크기가 선형적으로 증가함을 의미한다. 벼 작물의 순일차생산량(NPP; net primary production)는 벼논 생태계의 NEE와 토양의 타가호흡량(Rh; heterotrophic respiration)의 합으로 나타낼 수 있다. 수확시기의 벼 작물의

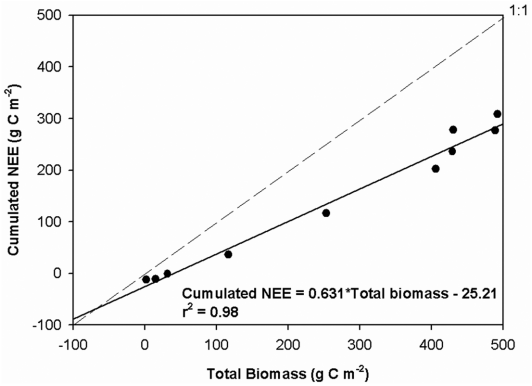

Fig. 8. Linear relationships between the cumulated net ecosystem exchange (NEE) and total biomass of rice from June to October in 2012.

NPP는 489g C m^{-2} 로 조사되었고, 동일시기에 적산된 NEE는 277g C m^{-2}로 분석되어서(Table 5), 이들의 차인 Rh는 212g C m^{-2}로 추정되었다. 또한, 동일시기에 적산된 Re는 433g C m^{-2} 분석되었으므로(Table 5), 벼 작물의 자가호흡량(Ra; autotrophic respiration)은 221g C m^{-2}로 추정되었다.

IV. 고 찰

Moon *et al.*(2003)의 국내 벼논 생태계의 CO_2 교환에 대한 연구에서 NEE는 7월하순~8월상순에 최대값이 나타났으며, 크기가 약 -12g C m^{-2} d^{-1}로 보고했지만, 본 연구에서는 NEE의 최대값이 8월상순~8월중순에 나타났고, 크기가 약 -8.8g C m^{-2} d^{-1}로 조사되어 Moon *et al.*(2003)의 연구결과와 다소 달랐는데, 이는 작부체계와 벼 품종의 차이에서 오는 결과로 판단되었다. 즉, Moon *et al.*(2003)은 벼 단작 작부체계의 논 생태계에서 조생종의 벼를 대상으로 조사했지만, 본 연구는 벼-보리 이모작 작부체계의 논 생태계에서 중만생종의 벼를 대상으로 분석했기때문에, 벼작물의 생육시기와 생육량에서 차이가 발생한 것으로 추정되었다. 하지만, 벼작물의 생육단계별 CO_2 플럭스의 변화 패턴은 두 연구에서 상당히 유사했다.

Saito *et al.*(2005)은 미기상학적 에디공분산기법을 통한 논 생태계의 CO_2 플럭스 연구를 통해서 NEE와 GPP 및 Re가 벼 재배기간동안에 각각 -398, 1144, 746g C m^{-2}로 추정된다고 보고하였고, Alberto *et al.*(2009)은 담수조건의 벼논 생태계에서 NEE, GPP, Re가 각각 -258, 778, 521g C m^{-2}로 추정된다고 보고하였다. 본 연구에서는 NEE, GPP, Re가 각각 -277.1, 710.3, 433.2g C m^{-2}로 추정되어, Alberto *et al.*(2009)의 연구결과와는 유사하고, Saito *et al.*(2005)의 연구결과와는 다른것으로 평가되었다. 하지만, 조사기간으로 나눈 일평균 값으로 비교하면 반대의 결과를 나타냈다. 즉, Saito *et al.*(2005)이 수행한 연구 대상지역은 벼 단작 작부체계를 도입한 곳으로 조사기간은 192일이었고, 조사기간으로 나눈 일 평균 NEE, GPP, Re가 각각 -2.1, 6.0, 3.9g C m^{-2}로 본 연구결과와 유사하였다. 반면에, Alberto *et al.*(2009)이 수행한 연구에서 담수조건의 벼논 생태계의 조사기간은 113일이었고, 조사기간으로 나눈 일 평균 NEE, GPP, Re가 각각 -2.3, 6.9, 4.9g C m^{-2}로 본 연구와 다른 결과를 나타냈다. 또한, Alberto *et al.*(2009)이 수행한 호기조건의 벼논 생태계에서는 일평균 NEE, GPP, Re가 각각 -0.8, 4.6, 3.8g C m^{-2}로 추정된다고 보고하여 본 연구의 결과와 많은 차이를 나타냈다. 이와 같은 연구결과의 차이는 품종, 재배관리, 작부체계, 환경요인 등에서 그 원인을 추정할 수 있다. 따라서, 앞으로는 이러한 원인들을 구명하기 위한 탄소 플럭스 동태연구가 다양한 벼 생산시스템을 대상으로 장기적으로 수행될 필요가 있다.

적 요

본 연구는 전라북도 김제시 부량면 신용리의 벼-보리 이모작 논에 설치된 플럭스 관측시스템에서 2012년 벼 재배기간동안(6월 9일~10월 20일)에 연속적으로 관측된 플럭스자료를 활용하여, 논 생태계와 대기간의 CO_2 및 에너지(현열, 잠열) 교환량의 계절적 변화를 분석하였다. CO_2 및 에너지의 교환량은 미기상학적인 에디공분산법으로 추정하였고, 환경인자(순복사, 강수량 등)와 작물체 생육량(엽면적지수, 초장 등)도 함께 측정・조사하였다. 관측된 플럭스자료는 보정과 결측보충의 과정을 거친 후 분석에 활용되었다. 결론적으로, 벼-보리 이모작 논 생태계에서 벼 재배기간동안의 CO_2의 순생태계교환량(NEE)과 총일차생산량(GPP) 및 생태적호흡량(Re)은 각각 단위면적(m^2)당 -277.1, 710.3, 433.2g C로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업(과제번호:PJ90722802)의 지원에 의해 이루어진 것임

REFERENCES

Alberto, M. C. R., R. Wassmann, T. Hirano, A. Miyata, A. Kumar, A. Padre, and M. Amante, 2009: CO_2/heat fluxes in rice field; Comparative assessment of flooded and non-flooded fields in the Philippinesm. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1737-1750.

Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, P. Ciais, M. Jung, N. Carvalhais, C. Rodenbeck, M. A. Arain, D. Baldocchi, G. B. Bonan, A. Bondeau, A. Cescatti, G. Lasslop, A. Lindroth, M. Lomas, S. Luyssaert, H. Margolis, K. W.Oleson, O. Roupsard, E. Veenendaal, N. Viovy, C. Williams, F. I. Woodward, and D. Papale, 2010: Terrestial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science* **329**(5993), 834-838.

Bhattacharyya, P., S. Neogi, K. S. Roy, and K. S. Rao, 2013: Gross primary production, ecosystem respiration and net ecosystem exchange in Asian rice paddy: an eddy covariance-based approach. *Current science* **104**(1), 67-75.

Choi, D. H., and S. H. Yun, 1989: Agroclimatic zone and characters of the area subject to climatic disaster in Korea. *Korean Journal of Crop Science* **34**(s02), 13-33.

Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), 2004: http://fao.org/ag/agp/agpc/doc/riceinfo/asia/ascont.htm (accessed in March 2009).

Frank, A. B., and W. A. Dugas, 2001: Carbon dioxid fluxes over a northern semiarid, mixed-grass prairie. *Agricultural and Forest Meteorology* **108**, 317-326.

Hossen, M. S., M. Mano, A. Miyata, M. A. Baten, and T. Hiyama, 2011: Seasonality of ecosystem respiration in a double-cropping paddy field in Bangladesh. *Biogeosciences Discuss* **8**, 8693-8721.

Kim, D. S., Harazono, Y, M. A. Baten, H. Nagai, and H. Tsuruta, 2002: Surface flux measurements of CO_2 and N_2O from a dried rice paddy in Japan during a fallow winter season. *Journal of the Air & Waste management association* **52**(4), 416-422.

Lee, X., W. Massman, and B. Law, 2004: *Handbook of Micrometeorology.* Kluwer Academic Publishers, Dordrech, The Netherlands, 250pp.

Lee, J. T., Y. S. Lee, K. Y. Kim, and K. M. Shim, 2005: CO_2 and Water Vapor Flux Measurement by Eddy Covariance Method in a Paddy Field in Korea. *Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 45-50.

Miyata, A., R. Leuning, O. T. Denmead, J. Kim, and Y. Harazono, 2000: Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology* **102**, 287-303.

Moon, B. K., J. K. Hong, B. R. Lee, J. I. Yun, E. W. Park, and J. Kim, 2003: CO_2 and energy exchange in a rice paddy for the growing season of 2002 in Hari, Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**(2), 51-60.

Papale, D., M. Reichstein, M. Aubinet, E. Canfora, C. Bernhofer, W. Kutsch, B. Longdoz, S. Rambal, R. Valentini, T. Vesala, and D. Yakir, 2006: Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogesciences* **3**, 571-583.

Reichstein, M., E. Falge, D. Baldocchi, D. Papale, M. Aubinet, P. Berbigier, C. Bernhofer, N. Buchmann, T. Gilmanov, A. Granier, T. Grunwald, K. Havrankova, H. Ilvesniemi, D. Janous, A. Knohl, T. Laurila, A. Lohila, D. Loustau, G. Matteucci, T. Meyers, F. Miglietta, J. M. Ourcival, J. Pumpanen, S. Rambal, E. Rotenberg, M. Sanz, J. Tenhunen, G. Seufert, F. Vaccari, T. Vesala, D. Yakir, and R. Valentini, 2005: On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration review and improved algorithm, *Global Change Biology* **11**, 1424-1439.

Ren, X. E., Q. X. Wang, C. L. Tong, J. Wu, K. L. Wang, Y. L. Zhu, Z. J. Lin, M. Watanabe, and G. Y. Tang, 2007: Estimation of soil respiration in a paddy ecosystem in the subtropical region of China. *Chinese Science Bulletin* **52**(19), 2722-2730.

Saigusa, N., S. Yamamoto, S. Murayama, H. Kondo, and N. Nishimura, 2002: Gross primary production and net ecosystem production of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology* **112**, 203-215.

Saito, M., A. Miyata, H. Nagai, and T. Yamada, 2005: Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agricutural for Meterology* **135**, 93-109.

Tseng, K. H., J. L. Tsai, A. Alagesan, B. J. Tsuang, M. H. Yao, and P. H. Kuo, 2010, Determination of methane and carbon dioxide fluxes during the rice maturity period in Taiwan by combining profile and eddy covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**, 852-859.

Uchijima, Z., 1976: In Vegetation and the Atmosphere. Monteith, J. L.(Eds.), Academic Press, London, vol. **2**, 33-64.

Webb. E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning, 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.

Wilczak, J. M., S. T. Oncley, and S. T. Stage, 2001: Sonic anemometer tilts correction algotithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**, 127-150.