

김제 벼-보리 이모작 논에서 벼 재배기간 동안의 순생태계 CO₂ 교환량에 대한 환경요인 분석

Environmental Controls on Net Ecosystem CO₂ Exchange during a Rice Growing Season at a Rice-Barley Double Cropping Paddy Field in Gimje, Korea

심교문* · 민성현 · 김용석 · 정명표 · 황 해 · 김석철 · 소규호

Shim, Kyo Moon*, Min, Sung Hyun, Kim, Yong Seok, Jeong, Myung Pyo, Hwang, Hae, Kim, Seok Cheol and So, Kyu Ho

국립농업과학원 농업환경부 기후변화생태과

Division of Agro-Climate Change & Ecology, National Academy of Agricultural Science, Suwon, Korea

요 지

미기상학적 방법인 에디공분산 기법을 이용하여 벼-보리 이모작의 논 생태계와 대기간 CO₂ 교환량의 계절적 변화를 조사하고, 벼-보리 이모작 작부체계에서 벼 재배기간의 CO₂ 교환량에 미치는 환경요인들과 지상부 생육량의 효과를 분석하였다. 관측된 CO₂ 플럭스자료는 보정과 결측 보충 등의 과정을 거친 후 분석에 활용되었다. 벼-보리 이모작 논 생태계에서 벼 재배기간 동안의 CO₂ 순생태계 교환량(NEE)과 총일차생산량(GPP) 및 생태적 호흡량(Re)은 각각 단위면적(m²)당 -215.6, 763.9, 548.3g C로 분석되었다. 순복사에너지(Rn)와 NEE의 관계는 이차함수로 나타낼 수 있으며, Rn의 이차함수는 NEE 변이의 66%를 설명하였다. 반면에 Re와 지온의 관계는 지수함수로 나타낼 수 있으며, 벼논이 배수생태에서는 Re에 대한 지온의 지수함수는 Re 변이의 43%를 설명하였다. 그리고 벼 작물의 지상부 생육량과 논 생태계의 CO₂ 플럭스(NEE, GPP, Re)는 유의성 높은 선형관계를 나타냈다. 따라서 환경인자 및 벼 작물 생육자료와 CO₂ 플럭스의 관계식으로 미 관측 논 생태계에 대한 CO₂ 플럭스의 추정이 가능할 것으로 판단되었다.

키워드 : 벼, 에디공분산, 이산화탄소 플럭스, 지상부 생육량, 환경요인

ABSTRACT

Using the Eddy Covariance technique, we analyzed seasonal variation in net ecosystem CO₂ ex-

* Corresponding author : E-mail: kmshim@korea.kr

change (NEE) and investigated the effects of environmental factors and aboveground biomass of rice on the CO₂ fluxes in a rice-barley double cropping paddy field of Gimje, Korea. Quality control and gap-filling were conducted before this investigation of the effects. The results have been showed that NEE, gross primary production (GPP), and ecosystem respiration (Re) during the rice growing period were -215.6, 763.9, and 548.3 g C m⁻², respectively. Relation between NEE and net radiation (Rn) could be described by a quadratic equation, and about 65 % of variation in NEE was explained by changes in Rn. On the other hand, an exponential function relating Re to soil temperature accounted for approximately 43 % of variation in Re under the flooded condition of paddy field. Aboveground biomass showed significant linear relationships with NEE ($r^2=0.93$), GPP ($r^2=0.96$), and Re ($r^2=0.95$), respectively.

Key words : Rice, Eddy Covariance, CO₂ Flux, Aboveground Biomass, Environmental Factor

1. 서론

온실가스 증가에 따른 지구 대기의 변화는 생태계에 영향을 주고, 이에 대해 생태계는 다시 대기에 영향을 미치는 되먹임(상호교환) 작용은 이미 잘 알려져 있다. 이에 세계 각국은 농업생태계를 비롯한 다양한 육상생태계의 식생과 대기 간에 교환되는 에너지, 물, 그리고, 온실가스(CO₂, CH₄ 등) 등에 대한 지표 플럭스를 정량적으로 파악하는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

이러한 육상생태계에 대한 대부분의 플럭스 관측이 산림생태계를 중심으로 진행되고 있는데, 그 이유는 산림생태계가 전 지구의 CO₂ 수지에 가장 큰 영향을 준다고 믿기 때문이다. 하지만, 육상생태계 중에 농경지가 약 12% 차지하고 있어(Wood *et al.*, 2000), 지역 및 전 지구적 CO₂ 수지에 농업생태계도 큰 역할을 하고 있을 것으로 기대되고 있다(Saito *et al.*, 2005).

특히, 벼 작물은 아시아의 주요 곡물이고, 아시아의 벼논 면적은 전 세계 벼 재배면적의 약 87%를 차지하고 있다(FAO, 2004). 국내에서도 총 농경지(1,730천 ha, 2012년 기준)의 약 51%인 883천 ha에서 재배되고 있는 주요 작물이므로(2013, 농축산식품부), 벼논 생태계는 아시아뿐만 아니라, 국내 농업분야의 온실가스 수지에 커다

란 역할을 하고 있다. 다시 말해서, 벼논 생태계는 토양 유기물의 혐기성 분해에 의해서 메탄(CH₄)은 대기 중으로 방출하고, 벼 잎의 탄소동화작용에 의해서 대기 중의 이산화탄소(CO₂)는 지표로 흡수하는 역할을 하고 있다.

식생지를 포함한 지표면과 대기 간에 교환되는 질량 및 에너지 플럭스를 측정하는 데에는 크게 두가지 방법이 있다. 하나는 일정한 부피를 가진 덮개를 이용해서 일정 시간의 덮개 내의 농도변화를 측정하여, 그것으로부터 플럭스를 구하는 생물학적 방법이며, 다른 하나는 미기상학적 기술을 이용하는 방법이다. 미기상학적 방법에는 여러 가지가 있으나, 주로 경도(gradient)법과 에디공분산(eddy covariance)법이 주로 사용되고 있다(농림부, 1999). 에디공분산법은 식생을 포함한 지표-대기 간에 교환되는 물리량의 연직 플럭스를 정량화하는데 사용되고 있다. 그리고 기존의 챔버 방법에 비해 관측지를 손상시키지 않으면서, 넓은 지역에 대해 적분된 플럭스를 연속적으로 장기간 관측할 수 있다는 장점 때문에 학계에서 강력하게 추천되고 있다(Steffen *et al.*, 1998).

에디공분산법으로 논 생태계에서 CO₂ 플럭스를 측정하기는 1980년대에 고속 반응의 적외선 CO₂ 분석기가 개발된 이후인데, 아시아 국가는 초창기의 일본(Ohtaki, 1984; Tsukamoto, 1993)

중심에서 2000년대 중·후반부터의 중국(Ren *et al.*, 2007), 방글라데시(Hossen *et al.*, 2011), 필리핀(Alberto *et al.*, 2009), 대만(Tseng *et al.*, 2010) 등으로 측정이 확대되어, 관개와 담수 혹은 호기성 벼논 생태계에서의 계절적 혹은 연간 CO₂ 플럭스의 변화량을 보고하고 있다. 국내에서도 벼 단작의 논 생태계를 대상으로 CO₂와 에너지의 교환량을 관측하여 보고하였으나(Moon *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2005), 일본, 중국 등 아시아의 다른 국가보다는 연구 빈도와 연구 결과가 다소 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 전북 김제시 부량면 신용리의 벼-보리 이모작 작부체계의 논에서 국립농업과학원이 장기적으로 운영하고 있는 논 생태계의 플럭스 관측시스템을 소개하고, 2012년 벼 재배기간 동안에 관측된 CO₂ 플럭스와 환경요인 및 벼 작물 생육량의 상관관계를 분석하여, 육상생태계의 CO₂ 수지에서 벼논 생태계의 역할과 농업분야의 온실가스 평가에 대한 기초자료를 확보하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 및 영농활동

연구지역(35°44' N, 126°51' E, 21m)은 전라북도 김제시 부량면 신용리 일대의 논 생태계로, 벼-보리 이모작 작부체계가 적용되고 있다. 관측장소의 취주거리(fetch)는 150~300 m 범위이며, 관측장소에서 남서쪽 방향으로 400 m 떨어진 곳에 소규모 농촌 마을이 위치해 있고, 서쪽방향으로 350 m 떨어진 곳에 교통량이 다소 적은 지방도로가 위치해 있다(Min *et al.*, 2013). 토양통은 물빠짐이 좋은 미사질양토의 전복토로, 표토의 유기물 함량은 32.3g C kg⁻¹이고, pH(water)는 5.6이며, 탄소와 질소함량은 각각 18.6g C kg⁻¹과 1.9g N kg⁻¹이다.

보리 수확 후(2012년 6월 8일), 벼 재배를 위

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

한 논물대기(6월 9일)와 논갈이(6월 10일)를 진행했으며, 비료는 밑거름으로 맞춤16호(남해화학)를 헥타르당 500kg(질소 기준 110kg ha⁻¹) 시비했고(6월 16일), 이삭거름으로 요소를 헥타르당 75kg(질소 기준 35kg ha⁻¹) 시비했다(8월 19일). 벼 품종은 중만생종인 신동진벼이고, 어린모 기계이앙방식으로 이앙했다(6월 21일). 벼 출수기는 8월 18일로 조사되었고, 벼 수확날짜는 10월 20일이었다(Table 1).

2.2 생육조사 및 생육단계 구분

벼 생육조사는 플럭스 관측시스템에서 서쪽방향으로 50m 떨어진 농가포장에서 약 2주 간격으로 수행하였다. 벼 작물의 초장과 분얼수(경수)는 벼 20주를 고정하여 조사하였고, 벼 군락의 엽면적지수(LAI)는 이동형 엽면적분석기(LAI-2000, LI-COR Bioscience Inc., USA)를 활용하여 비파괴방식으로 조사하였다. 벼 20주의 현장조사로 파악된 벼 작물의 생육량(초장, 분얼수)과 유사한 벼 작물체 5주를 채취하여, 실험실에서 작물체의 생체중, 건물중, 탄소/질소함량 등을 지상부(엽초,

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 October

엽신, 이삭)와 지하부(뿌리)로 나누어 부위별로 세부적으로 분석하였다. 플렉스 관측 타워의 3m 높이에 디지털카메라를 서쪽방향으로 설치하여, 1시간 간격으로 벼 작물의 생육상황과 농가포장의 영농활동을 감시하였고, 이를 토대로 벼 재배 기간을 총 5단계로 구분하여 논 생태계의 플렉스 분석에 활용하였다(Table 2).

2.3 환경인자 측정

순복사 센서(CNR1, Kipp & Zone B. V., The Netherlands)를 이용하여, 태양복사의 입사량과 반사량, 그리고 지구복사의 입사량과 반사량을 측정하였고, 자료집록기의 내부 연산에 의해서 순복사를 산출하였다. 지중열류량 센서(HFP1, Campbell scientific, Inc., USA)는 관측 타워의 서쪽과 동쪽에 각각 하나씩 총 2개를 지중 10 cm 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(TC-AV, Campbell scientific, Inc., USA)를 관측타워의 동쪽과 서쪽의 지중 10 cm 깊이에 하나씩 총 2개를 설치하여 토양수분과 지온의 변화를 측정하였다. 이들 환경인자들은 5초 간격으로 측정되고, 자료집록기(CR5000, Campbell Science Inc.,

USA)에는 30분 평균자료가 저장되며, CDMA 통신 모뎀을 통해서 실시간으로 수집하였다. 그리고, 2주 간격으로 현장 방문시 수동으로도 수집하였다(Min *et al.*, 2013).

2.4 CO₂ 등 물질 플렉스의 측정 및 보정

대기 중의 CO₂와 H₂O는 개방형 CO₂/H₂O 적외선 가스분석기(LI-7500, LI-COR Biosciences Inc., USA)로, 대기 중의 풍속과 온도는 3차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Science Inc., USA)로 초당 10회(10Hz)씩 측정하였고, 이들 데이터(풍속, 바람에 수송된 대기 중의 CO₂농도·H₂O 농도·온도)의 30분 평균에 대한 편차를 공분산하여 30분 평균 물리량 플렉스를 계산하였다.

10 Hz의 물리량 플렉스 원본자료와 30분 플렉스 평균자료는 자료집록기에 저장되며, CDMA 통신 모뎀을 이용하여 30분 평균자료를 실시간으로 수집했다. 또한, 2주 간격으로 현장에서 메모리 카드를 교체하는 방식으로 10 Hz 플렉스 원본자료를 수집했다.

미기상학적 에디공분산법으로 측정 및 계산된 30분 평균 플렉스자료는 Koflux의 표준화 프로그램에 따라 처리 과정을 수행하였다. Wilczak *et al.*(2001)이 제시한 평면 맞추기 회전(PFR; planar fit rotation)과 Webb *et al.*(1980)이 제시한 밀도 변동 보정을 수행하였으며, 불확실성을 감소시키기 위해서 FLUXNET의 표준 방법인 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한 튀는 자료 찾기 방법을 이용하였다(Papale *et al.*, 2006). 결측 보충(gapfilling) 과정으로는 FLUXNET의 표준화 방법인 수정된 색인 목록 방법을 이용하였다(Reichstein *et al.*, 2005).

2.5 CO₂ 플렉스의 분배(NEE, GPP, Re)

벼 군락과 대기권 사이의 CO₂ 순생태계 교환량(net ecosystem exchange, NEE)은 벼 작물의

광합성 동화작용에 의한 CO₂ 흡수량(gross primary production, GPP)과 작물체 및 토양의 호흡에 의한 CO₂ 배출량(ecosystem respiration, Re)의 차이로 나타낼 수 있다(식 1).

$$F_{NEE} = F_{Re} - F_{GPP} \quad (식 1)$$

Re는 작물 및 토양의 주간호흡(ReD)과 야간호흡(ReN)의 합으로 나타낼 수 있는데(식 2), 야간호흡량은 식 3과 같이 계산된다.

$$F_{Re} = F_{Re(D)} + F_{Re(N)} \quad (식 2)$$

$$F_{Re(N)} = A \exp(BT) \quad (식 3)$$

여기서, A와 B는 회귀분석에 의해 결정된 경험 상수이며, B는 온도계수(Q10)로 $\ln(Q10)/10$ 으로 나타내고, T는 야간지온이다. 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).

3. 결과 및 고찰

3.1 벼 작물의 생육량 변화

벼 작물의 생육량 변화를 시계열로 나타내면, 그림 1과 같다. 벼 작물의 분얼수는 착근단계(Ⅱ)부터 분얼단계(Ⅲ)까지 단위면적(m²)당 258.8(±32.7)개에서 835.5(±70.0)개로 크게 증가되었으나, 신장단계(Ⅳ)부터 감소하여 수확기에는 311.1(±20.9)개로 조사되었다. 벼 작물의 초장은 착근단계에서 분얼단계까지 15.6(±0.7) cm에서 55.4(±0.9) cm로 서서히 늘다가, 신장단계를 거쳐 성숙단계(Ⅴ) 중반에는 95.4(±1.1) cm까지 크게 증가한 후, 수확기까지 조금 줄어드는 양상을 나타냈고, 엽면적 지수(LAI)는 성숙단계 중반에 3.8(±0.1)로 가장 높았다가 그 후 낮아져서 수확기에

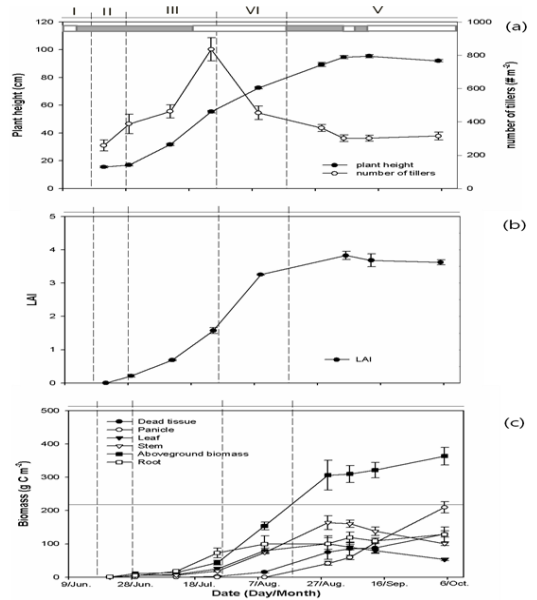


Fig. 1. Seasonal variations of rice biomass in the 2012 growing season: (a) number of tillers and height, (b) leaf area index, and (c) carbon contents of each tissues. Flooding conditions of the rice paddy field are represented by the horizontal bar at the top of (a): shaded for flooding and unshaded for unflooding.

는 3.3(±0.0)으로 조사되었다. 벼 작물의 지상부 총 건물중은 신장단계부터 급속히 증가하는 것으로 조사되었고, 지하부 건물중(뿌리)은 분얼단계까지는 급속히 증가한 후 신장 단계부터는 서서히 증가하는 것으로 조사되었다.

3.2 벼 논생태계의 환경요인 및 CO₂ 플럭스의 계절적 변화

플럭스 연구사이트의 벼 재배기간 동안의 평균 기온은 22.1°C이었고, 평균 순복사에너지는 123.6 Wm⁻²로 조사되었다. 또한, 동 기간의 누적강수량은 1,138mm이었고, 강수일수는 53일이었는데, 태풍 ‘볼라벤’과 ‘덴빈’이 영향을 미친 8월 하순과 9월 중순에 많은 강수량이 관측되었다. 벼논에서의 토양수분은 담수 여부에 따라 크게 변화되

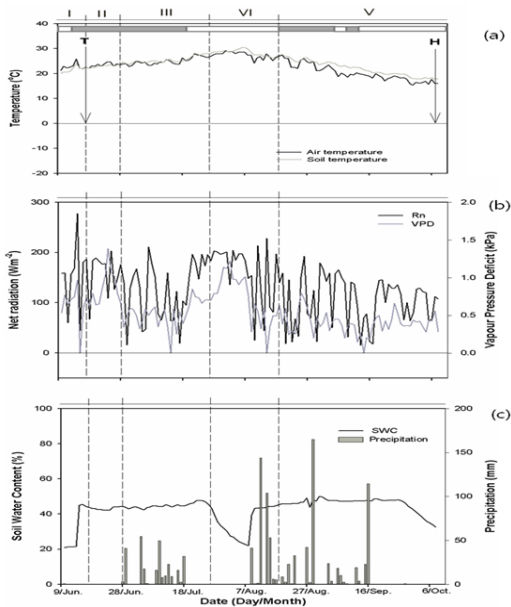


Fig. 2. Seasonal variations in: (a) air temperature, (b) net radiation and vapor pressure deficit, (c) soil moisture and precipitation at the Gimje paddy flux site during the growing period in 2012. Flooding conditions of the rice paddy field are represented by the horizontal bar at the top of (a): shaded for flooding and unshaded for unflooding.

었는데, 본 연구에서는 벼 재배기간 동안의 지중 10 cm 깊이의 토양수분 함량이 평균 42%로 관측되었다(Fig. 2).

벼-보리 이모작 논외의 벼 재배기간 동안 CO_2 플럭스의 계절적 변이는 그림 3과 같다. 분석기간 동안의 NEE는 단위면적(m^2)당 -1.9 g C d^{-1} 이었고, GPP와 Re 는 각각 6.9 와 4.2 g C d^{-1} 로 조사되었고, 이들 수치에 총 벼 재배기간(134일)을 곱한 누적 NEE와 GPP 및 Re 는 각각 단위면적당 -228.9 , 742.5 , 513.6 g C 로 분석되었다(Table 4). 이와 같은 수치는 Alberto *et al.*(2009)의 연구결과와 아주 유사하였지만, Saito *et al.*(2005)의 연구결과와는 다르게 나타났다. 이와 같은 연구결과의 차이는 벼 품종, 영농활동, 환경요인 등에

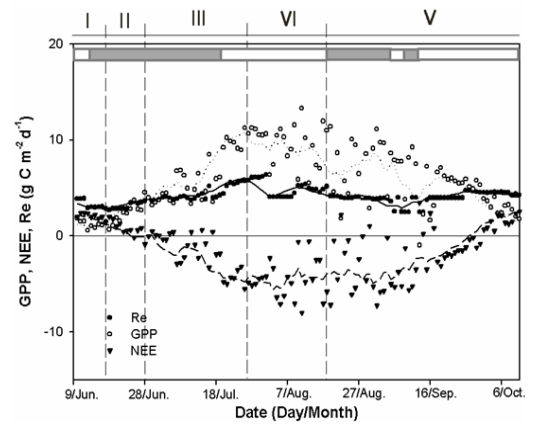


Fig. 3. Seasonal variations in daily gross primary production (GPP), ecosystem respiration (Re), and net ecosystem exchange (NEE) in the 2012 growing season. Flooding conditions of the rice paddy field are represented by the horizontal bar at the top: shaded for flooding and unshaded for unflooding.

서 그 원인을 추정할 수 있으나, 작부체계의 차이에 따른 벼 생육기간의 차이가 가장 큰 원인으로 판단되었다. Saito *et al.*(2005)이 수행한 연구대상지역은 벼 단작 작부체계를 도입한 곳으로 분석기간이 총 192일로 본 연구대상지역보다 분석기간이 68일 더 길었다. CO_2 플럭스를 벼 생육단계별로 구분하여 분석하면, NEE는 광합성이 가장 왕성한 신장단계(IV, $-4.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)에서 가장 많은 CO_2 가 흡수되었고, 다음으로 분얼단계(III, -1.7), 성숙 단계(V, -1.1) 순으로 많이 흡수된 반면에, 이앙 전단계(I, $+1.1$)와 착근 단계(II, $+0.3$) 그리고 성숙단계의 후반부에서는 CO_2 가 방출되는 것으로 분석되었다(Table 3).

3.3 환경요인 및 생육량과 CO_2 플럭스의 관계

3.3.1 Rn과 GPP

벼 재배기간 동안에 생육단계별로 흡수된 순복

Table 3. Net ecosystem exchange (NEE), gross primary production (GPP), and ecosystem respiration (Re) for five stages during the 2012 rice cultivation period

Stage	NEE		GPP		Re	
	Averaged (g C m ⁻² d ⁻¹)	Cumulated (g C m ⁻²)	Averaged (g C m ⁻² d ⁻¹)	Cumulated (g C m ⁻²)	Averaged (g C m ⁻² d ⁻¹)	Cumulated (g C m ⁻²)
Pre-transplanting(I)	1.1±0.4	13.3	1.8±0.4	21.4	2.9±0.0	34.7
Rooting(II)	0.3±0.2	2.5	3.2±0.2	25.2	3.5±0.1	27.6
Tillering(III)	-1.7±0.4	-46.5	6.0±0.5	162.3	4.3±0.1	115.8
Elongation(IV)	-4.7±0.4	-113.2	9.7±0.4	233.5	5.0±0.2	120.3
Ripening(V)	-1.1±0.4	-71.7	5.1±0.4	321.3	3.9±0.1	249.9
Total(I ~ V)	-1.9±0.3	-228.9	6.1±0.3	742.5	4.2±0.7	513.6

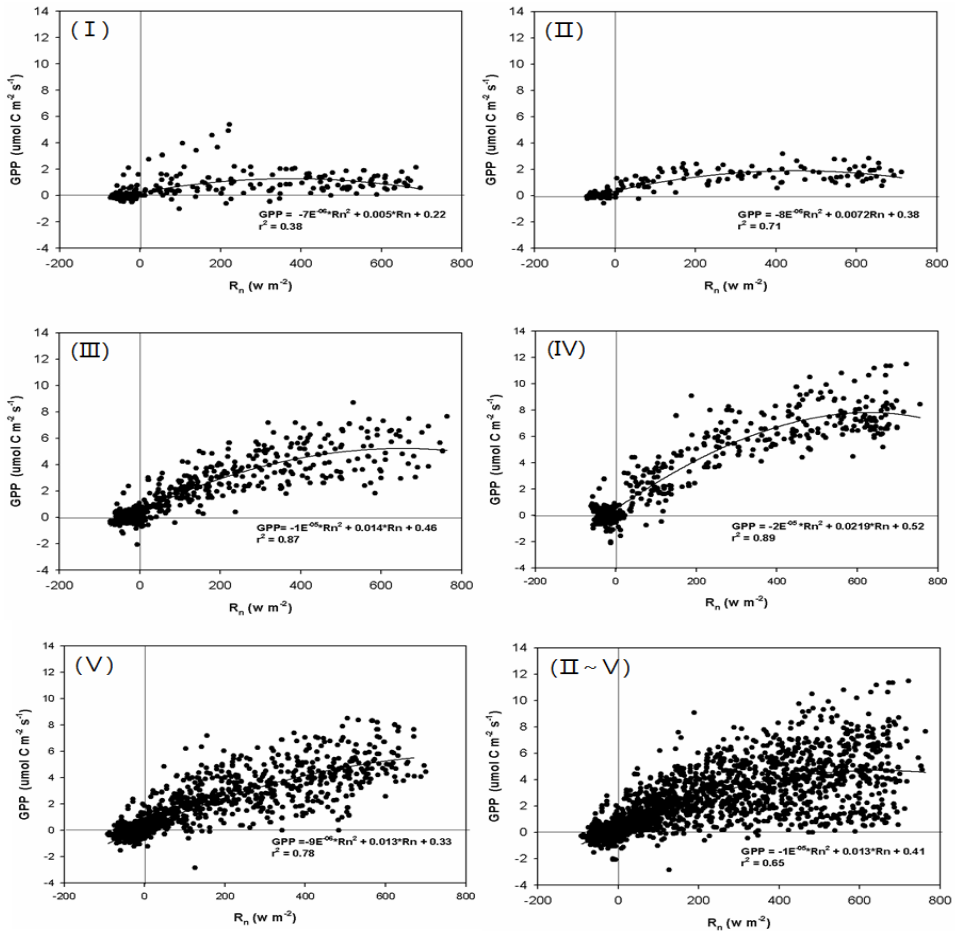


Fig. 4. Relationship between gross primary production (GPP) and net radiation (R_n) in the 2012 rice growing season: (I) Pre-transplant, (II) Rooting, (III) Tillering, (IV) Elongation, and (V) Ripening.

사 에너지(R_n)와 총일차생산량(GPP)의 관계는 그림 4와 같이 이차함수로 나타낼 수 있다. 이양전 단계(I)를 제외하면, 대부분의 벼 생육단계에서는 논 생태계로 흡수되는 R_n 이 증가함에 따라 GPP가 증가하는 것으로 분석되었다. 특히, 신장단계(IV)에서 R_n 의 증가 대비 GPP의 증가 폭이 가장 컸으며, 신장단계에서의 이차함수는 GPP 변이의 89%를 설명하고 있다. 또한, 이양전 단계를 제외한 벼 생육단계에서의 GPP에 대한 R_n 의 이차함수는 GPP 변이의 65%를 설명하였다.

3.3.2 R_n 과 NEE

벼 생육단계별로 흡수된 순복사 에너지(R_n)와 CO_2 의 순생태계교환량(NEE)의 관계는 R_n 과 GPP의 관계와 마찬가지로 이차함수로 나타낼 수 있다(Fig. 5). 이양전 단계(I)를 제외한 모든 벼 생육단계에서 R_n 이 증가함에 따라 논 생태계로의 순 CO_2 흡수가 증가되는 것으로 분석되었다. 분얼단계(III)와 신장단계(IV)에서는 NEE에 대한 R_n 의 이차함수가 NEE 변이의 89%를 설명하고 있지만, 성숙단계(V)에서는 NEE 변이의 71%를 설

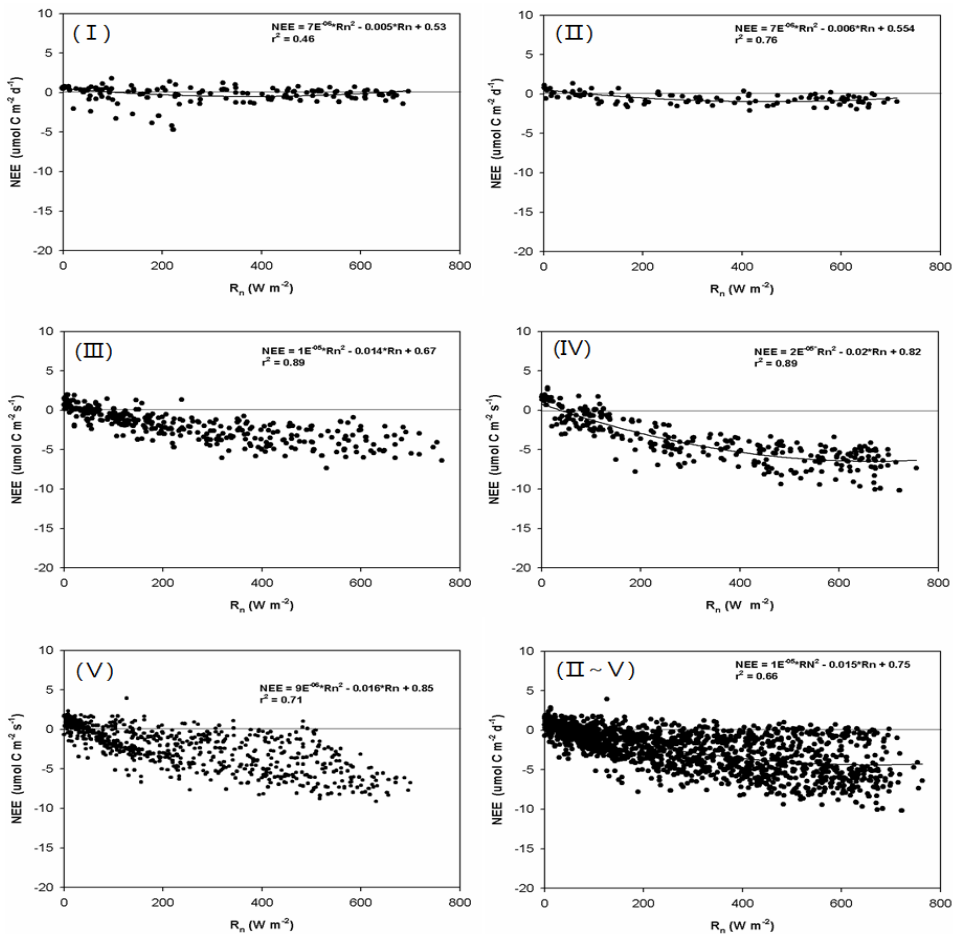


Fig. 5. Relationship between net ecological exchange of CO_2 (NEE) and net radiation (R_n) in the 2012 rice growing season: (I) Pre-transplant, (II) Rooting, (III) Tillering, (IV) Elongation, and (V) Ripening.

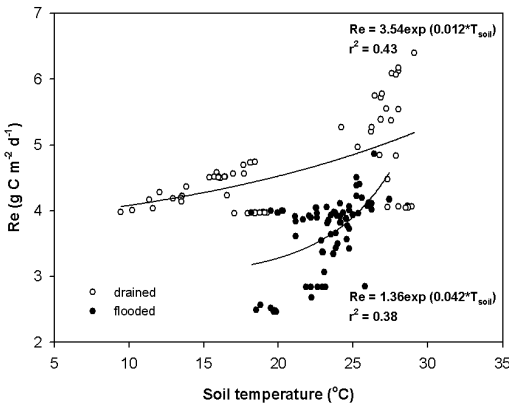


Fig. 6. Relationship between ecological respiration (Re) and soil temperature in the 2012 rice growing season.

명하여 다소 낮은 것으로 분석되었다. 이양전 단계를 제외한 벼 생육기간에서의 NEE에 대한 Rn의 이차함수는 NEE 변이의 66%를 설명하고 있다.

3.3.3. 지온과 Re

그림 6은 벼 생육기간 동안의 생태계 호흡량 (Re)과 지온의 관계를 나타내고 있다. 지온이 높아짐에 따라 벼논 생태계의 Re는 지수적으로 증가하였다. 벼논을 배수와 담수상태로 구분하여 지온과 Re의 관계를 분석하면, 벼논이 배수상태일 때는 대기 중으로 방출되는 Re가 담수상태일 때보다 훨씬 컸는데, 이는 벼논이 담수상태일 때에는 토양으로부터 호흡에 의해 직접 방출되는 CO₂가 논물에 의해서 제한되기 때문으로 판단된다(Saito *et al.*, 2005). 벼논이 배수상태에서는 Re에 대한 지온의 지수함수가 Re 변이의 43%를 설명하는 반면에, 담수상태에서는 지온의 지수함수가 Re 변이의 38%를 설명하고 있다.

3.3.4 CO₂ 플럭스(NEE, GPP, Re)와 지상부 생육량의 관계

벼 생육기간 동안 벼 작물의 지상부 생육량과

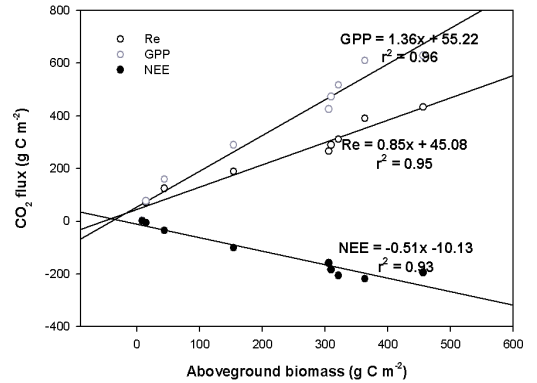


Fig. 7. Relationship between aboveground biomass and accumulated CO₂ flux in the 2012 rice growing season.

논 생태계의 CO₂ 플럭스는 유의성 높은 선형관계를 나타냈다(Fig. 7). 이는 지상부의 생육량이 증가함에 따라 GPP($r^2=0.96$, $n=9$, $p<0.001$), NEE($r^2=0.93$, $n=9$, $p<0.001$), Re($r^2=0.95$, $n=9$, $p<0.001$)의 절대 크기가 선형적으로 증가함을 의미한다.

사사

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

참고문헌

- 농림축산식품부, 2013, 농림축산식품 주요 통계 (발간등록번호 : 11-1543000-000128-10), 540 pp.
- 농림부, 1999, 전국 농업기상 감시 및 실시간 작황진단체계 구축 과제의 최종보고서(총괄연구책임자 : 윤진일), 농림부, 97-100.
- Alberto, M. C. R., R. Wassmann, T. Hirano, A. Miyata, A. Kumar, A. Padre, and M. Amanate, 2009, CO₂/heat fluxes in rice field: comparative assessment of flooded and non-flood-

- ed fields in the Philippines, **Agricultural and Forest Meteorology**, **149**, 1737-1750.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), 2004, <http://fao.org/ag/agp/agpc/doc/riceinfo/asia/ascont.htm> (accessed in October 2013).
- Hossen, M. S., M. Mano, A. Miyata, M. A. Batten, and T. Hiyama, 2011, Seasonality of ecosystem respiration in a double-cropping paddy field in Bangladesh, **Biogeosciences Discussions**, **8**, 8693-8721.
- Lee, J. T., Y. S. Lee, K. Y. Kim, and K. M. Shim, 2005, CO₂ and water vapor flux measurement by eddy covariance method in a paddy field in Korea, **Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology**, **7**, 45-50. (in Korean with English abstract)
- Moon, B. K., J. K. Hong, B. R. Lee, J. I. Yun, E. W. Park, and J. Kim, 2003, CO₂ and energy exchange in a rice paddy for the growing season of 2002 in Hari, Korea, **Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology**, **5**, 51-60. (in Korean with English abstract)
- Min, S. H., K. M. Shim, Y. S. Kim, M. P. Jung, S. C. Kim, and K. H. So, 2013, Seasonal variation of carbon dioxide and energy fluxes during the rice cropping season at rice-barely double cropping paddy field of Gimje, **Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology**, **15**, 273-281. (in Korean with English abstract)
- Ohtaki, E., 1984, Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport, **Boundary-Layer Meteorology**, **29**, 85-107.
- Papale, D., M. Reichstein, M. Anbinet, 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, **Biogeosciences**, **3**, 571-583.
- 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**, 2722-2730.
- 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.
- Saito, M., A. Miyata, H. Nagai, and T. Yamada, 2005, Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan, **Agricultural for Meteorology**, **135**, 93-109.
- Steffen, W. L., I. Noble, J. Canadell, M. Apps, E-D. Schulze, and P. G. Jarvis, 1998, The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto protocol, **Science**, **280**, 1393-1394.
- Tseng, K. H., J. L. Tsai, A. Alagesan, B. J. Tsuang, M. H. Yao, and P. H. Kuo, 2010, De-

- termination 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.
- Tsukamoto, O., 1993, Turbulent fluxes over paddy field under various ponding depth. **Japanese Journal of Agricultural Meteorology**, **49**, 19-25. (in Japanese with English abstract)
- Wilczak, J. M., S. T. Oncley, and S. T. Stage, 2001, Sonic anemometer tilts correction algorithms, **Boundary-Layer Meteorology**, **99**, 127-150.
- 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.
- Wood, S., K. Sebastian, and S. J. Scherr, 2000, Pilot Analysis of Global Ecosystem. International Food Research Institute and World Resources Institute, Washington DC, 130 pp.