

김제 보리-벼 이모작지에서의 순 생물상생산량의 추정

심교문* · 민성현 · 김용석 · 정명표 · 최인태
국립농업과학원

(2015년 5월 14일 접수; 2015년 6월 26일 수정; 2015년 6월 29일 수락)

Estimation of Net Biome Production in a Barley-Rice Double Cropping Paddy Field of Gimje, Korea

Kyo-Moon Shim*, Sung-Hyun Min, Yong-Seok Kim, Myung-Pyo Jung and In-Tae Choi

National Academy of Agricultural Science, RDA, Wanju, Korea

(Received May 14, 2015; Revised June 26, 2015; Accepted June 29, 2015)

ABSTRACT

Fluxes of carbon dioxide (CO₂) were measured above crop canopy using the Eddy Covariance (EC) method, and emission rate of methane (CH₄) was measured using Automatic Open/Close Chamber (AOCC) method during the 2012-2013 barley and rice growing season in a barley-rice double cropping field of Gimje, Korea. The net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ in the paddy field was analyzed to be affected by crop growth (biomass, LAI, etc.) and environment (air temperature, solar radiation, etc.) factors. On the other hand, the emission rate of CH₄ was estimated to be affected by water management (soil condition). NEE of CO₂ in barley, rice and fallow period was -100.2, -374.1 and +41.2g C m⁻², respectively, and CH₄ emission in barley and rice period was 0.2 and 17.3 g C m⁻², respectively. When considering only CO₂, the barley-rice double cropping ecosystem was estimated as a carbon sink (-433.0g C m⁻²). However, after considering the harvested crop biomass (+600.3 g C m⁻²) and CH₄ emission (+17.5g C m⁻²), it turned into a carbon source (+184.7g C m⁻²).

Key words: Barley-rice double cropping paddy field, CH₄ emission, CO₂ flux, Net biome production

I. 서 론

벼를 주로 재배하는 논 생태계는 메탄(CH₄)의 주요 배출원으로(Khalil and Rasmussen, 1983; Bartlett and Harris, 1993), 전 지구에서 인위적으로 배출되는 CH₄의 10~12%가 논 생태계에서 기인하는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2007). 또한, 논 생태계는 농작물의 광합성에 의한 동화작용으로 대기로부터 이산화탄소(CO₂)를 흡수하고, 이와 동시에 작물의 생장에 필요한 자가호흡과 토양 미생물에 의한 타가호흡을 통해 대기 중으로 CO₂를 배출하고 있다. 이와 같이 논 생태계는 육상생태계의 온실

가스 농도의 계절적 변화에 큰영향을 미치고 있다.

보리-벼 이모작 논 생태계에서 발생하는 주요 온실 가스는 CO₂, CH₄, 아산화질소(N₂O) 등으로, 챔버방식과 미기상학적 방식으로 측정할 수 있다. 그 중에 CH₄과 N₂O는 주로 개폐형 챔버를 이용하여 가스를 포집 후 Gas Chromatographs(GC)를 이용하여 측정하는데, 그 이유는 이들 온실가스가 대기 중에서 낮은 농도로 존재하기 때문이다(International Atomic Energy Agency, 1992; Hutchinson and Livingston, 1993). 반면에 CO₂는 개방형 에디공분산과 개폐형 챔버의 두가지 방식에 의해 적외선 가스 분석기(IRGA)



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

를 이용하여 측정하고 있다(Field *et al.*, 1989). 이중에 에디공분산은 고속반응 CO₂ 분석기가 개발된(1980년대) 이후부터 널리 활용되고 있는 기법으로 육상생태계의 지표-대기간에 교환되는 CO₂를 관측환경의 손상을 최소화하면서, 연속적으로 측정할 수 있는 장점이 있다(Baldocchi *et al.*, 2001). 따라서 농경지(Miyata *et al.*, 2000; Campbell *et al.*, 2001), 초지(Balogh *et al.*, 2007; Veenendaal *et al.*, 2007; Ferlan *et al.*, 2011), 산림(McCaughey *et al.*, 2006; Bonneville *et al.*, 2008; Clement *et al.*, 2012) 등의 육상생태계의 플럭스 관측에 널리 활용되고 있다.

최근에는 아시아의 논 생태계를 대상으로 CO₂ 플럭스와 CH₄배출량을 에디공분산 방식과 챔버 방식으로 각각 측정하여 종합 분석한 결과물이 학계에 보고되고 있다(Yagi *et al.*, 1996; Saito *et al.*, 2005; Alberto *et al.*, 2009; Yang and Chang, 2001). 하지만, 아시아의 논 생태계는 다양한 기후지대(열대에서 온대)에서 다양한 벼 품종이 재배되고 있고, 지역에 따른 토양의 물리적, 화학적 특성과 영농활동(시비, 물관리, 작부체계 등) 등이 서로 상이하므로 논 생태계의 CO₂ 플럭스와 CH₄ 배출량은 지역에 따라 차이를 나타내고 있다(Bhattacharyya *et al.*, 2012). 예를 들면, Saito *et al.* (2005)은 일본 츠쿠바 지역의 논 생태계(벼 단작체계)를 대상으로 벼 재배기간동안의 NEE를 -398.0g C m⁻²으로 산정하였고, Takimoto *et al.* (2010)은 오카야마 지역의 논 생태계(벼-보리 이모작 작부체계)를 대상으로 벼 재배기간동안의 NEE를 -350.0g C m⁻²으로 추정하였다. 또한, Alberto *et al.*(2009)은 필리핀 국제미작연구소에서 관개시설이 설치되어 있는 논 생태계에서는 NEE가 -258.0g C m⁻²인 반면에, 관개시설이 설치되어 있지 않은 논 생태계에서는 NEE가 -85g C m⁻²인 것으로 추정하였다. 따라서 다양한 작부체계와 다양한 지역의 논 생태계를 대상으로 CO₂ 플럭스와 CH₄ 배출량을 정량화할 필요가 있다.

한편, 1년생 작물을 주로 재배하고 있는 논 생태계는 작물의 광합성에 의해서 대기중의 CO₂를 흡수하고 있지만, 산림생태계와는 달리, 탄소흡수원으로 인정을 받지 못하고 있다. 그 이유는 수확물의 소비와 분해, 작물체의 소각 등으로 작물의 광합성에 의해 흡수된 대부분의 CO₂가 논 생태계에 머무르지 못하고 대기중으로 방출되기 때문이다. 따라서 에디공분산 방법으로 관측된 탄소 교환량에 농작물의 수확에 따른 탄소

배출량과 CH₄ 형태로 배출되는 탄소량을 함께 고려하는 순 생물상 교환량(Net Biome Production, NBP)의 분석이 요구되고 있다.

본 연구는 에디공분산 방식과 자동개폐식 챔버 방식을 이용하여 보리-벼 이모작 작부체계의 논 생태계를 대상으로, 연속적으로 CO₂ 교환량과 CH₄ 배출량을 측정하여 CO₂ 수지와 CH₄ 수지(배출량)를 정량화하고, 여기에 농작물의 수확에 따른 탄소배출량을 추가하여 보리-벼 이모작 논 생태계의 연간 NBP, 즉 연간 탄소수지를 산정하기 위해 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 지역의 개요

연구대상 지역은 전라북도 김제시 부량면 신용리 일대의보리-벼 이모작의 논 생태계(35°44'N, 126°51'E, 21m)로, CO₂/H₂O 플럭스 관측타워는 취주거리(fetch)가 150~300m 범위의 논 한가운데에 위치해 있다. 관측장소에서 남서쪽 방향으로 400m 떨어진 곳에 소규모 농촌 마을이 위치해 있고, 서쪽방향으로 350m 떨어진 곳에 교통량이 다소 적은 지방도로가 지나고 있다. 토양층은 미사질양토의 전복토층으로, 표토의 유기물 함량은 32.3g C kg⁻¹이고, pH(water)는 5.6이며, 탄소와 질소함량은 각각 18.6g C kg⁻¹와 1.9g N kg⁻¹로 조사되었다(Min *et al.*, 2013).

2.2. 영농활동 조사

2012년 10월 20일에 겉보리 품종인 영양보리를 휴림광산과 방식으로 파종하였다. 보리의 밀거름으로 맞춤형 16호(남해화학)를 헥타르(ha)당 500kg(질소기준 110kg ha⁻¹) 시비했고, 이듬해 3월 상순의저온으로 인한 동해(凍害)가 예상되어 추비는 사용하지 않았다. 보리의 출수기는 2013년 5월 5일로 조사되었고, 보리의 수확날짜는 6월 8일이었다. 보리 수확후, 벼 재배를 위한 논물대기(2013.6.12)와 논갈이(2013.6.15)를 수행하였다. 벼의 밀거름으로 맞춤형 16호(남해화학)를 ha당 500kg(질소기준 88kg ha⁻¹)를 시비하였고(2013.6.16), 벼 이삭거름으로 요소를 ha당 75kg(질소기준 35kg ha⁻¹)를 시비하였다. 벼 품종은 중만생종인 신동진벼이고, 2013년 6월 21일에 어린모 기계이앙방식으로 이앙하였다. 벼의 출수기는 동년 8월 15일로 조사되었고, 수확날짜는 2013년 10월 21일이었다(Table 1). 수확 및

Table 1. Schedule of field management at the study site

Year	Date or period	Event
2012	Oct. 20	Barley sowing and basal fertilization
2013	May 5	Barley heading
	Jun. 8	Barley harvest
	Jun. 12~15	Flooding and plowing
	Jun. 16	Basal fertilization
	Jun. 21	Rice transplanting
	Aug. 15	Rice heading
	Aug. 21	Supplemental fertilization
	Oct. 21	Rice harvest

수거에 따른 논 생태계의 작물체의 이동현황을 살펴보면, 보리와 벼의 종실은 식용으로 수확되고, 보릿짚과 벃짚은 축우용 조사료로 수거되어 논 생태계 외부로 이동하였으나, 작물체의 뿌리와 지상부의 그루터기는 논 생태계 내부에서 유기물로 활용되었다.

2.3. 작물 성장량 조사

벼와 보리의 성장량 조사는 관측타워의 주풍향에 위치한 농가포장에서 2주 간격으로 수행하였다. 벼는 연속된 20주(15cm×30cm×20=9,000cm²)를 대상으로, 보리는 일정규모의 생육조사지(20cm×100cm=2000cm²) 3곳을 대상으로 작물체의 성장량을 조사하였다. 벼와 보리의 건물중과 탄소함량은 현장조사로 파악된 작물 성장량(초장, 분얼수)과 유사한 작물체(벼는 3주, 보리는 5개체)를 채취하여, 지상부(엽초, 엽신, 이삭)와 지하부(뿌리)로 나누어 조사하였다. 보리의 엽면적 지수(Leaf Area Index; LAI)는 채취한 작물체의 엽초를 파괴형 식생군락분석기(LI-3100, LI-COR Biosciences Inc., USA)를 이용하여 조사하였고, 벼의 LAI는 이동형 식생군락분석기(LAI-2000, LI-COR Biosciences Inc., USA)를 이용하여 조사하였다. 관측타워의 3m 높이에 디지털카메라를 서쪽방향으로 설치하여 1시간 간격으로 농가포장의 생육상황과 영농활동을 촬영하였다.

2.4. 환경인자 측정

태양에너지 측정 센서(CNR1, Kipp&Zone B.V., The Netherlands)를 지상 1.5m 위치에 설치하여 태양 복사와 지구복사의 입사량과 반사량을 측정하였고, 자료집록기의 내부연산을 통해 순복사와 알베도를 계산하였다. 지중열류량 센서(HFP1, Campbell scientific,

Inc., USA)는 관측타워의 서쪽과 동쪽에 각각 하나씩 총 2개를 지중 10cm 깊이로 설치하여 지표면과 땅속의 열 이동량을 측정하였고, 온·습도 센서(HMP45C, Campbell scientific, Inc., USA)는 관측타워의 1m와 2m 높이에 각각 설치하여 벼/보리 군락의 온도와 습도 변화를 관측하였다. 또한 토양수분 센서(CS616, Campbell scientific, Inc., USA)와 토양온도 센서(TCAV, Campbell scientific, Inc., USA)는 관측타워의 동쪽과 서쪽의 지중 10cm 깊이로 각각 2개를 설치하여 땅속의 온도와 수분함량을 관측하였다. 이들 환경인자들은 5초 간격으로 측정하였고, 30분 평균처리하여 자료집록기에 저장하였다.

2.5. 물리량(CO₂ 등) 플럭스의 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 Scientific Inc., USA)로 초당 10회(10Hz)씩 측정하였고, 이들 데이터(풍속, 바람에 수송된 대기 중의 CO₂ 농도/H₂O 농도/온도)의 30분 평균에 대한 편차를 공분산하여 30분 평균 물리량 플럭스를 계산하였다.

미기상학적 에디공분산법으로 측정 및 계산된 30분 평균 플럭스자료는 KoFlux의 표준화 프로그램에 따라 보정 과정을 수행하였다. 즉, Lee *et al.*(2004)와 Wilczak *et al.*(2001)이 제시한 평면 맞추기 회전(Planar Fit Rotation; PFR)과 Webb *et al.*(1980)이 제시한 밀도변동 보정을 수행하였고, 불확실성을 감소시키기 위해서 FLUXNET의 표준 방법인 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한 튀는자료찾기 방법을 이용하였다(Papale *et al.*, 2006). 에디공분산법에 의한 CO₂ 플럭스의 분석은 일정한 난류가 필요한데, 야간의 CO₂ 플럭스는 이런 조건을 만족시키지 못하는 경우가 많으므로, 야간의 CO₂ 플럭스에 대한 마찰 속도(μ^*)의 임계점을 산출해야 한다. 본 연구에서는 분석기간에 대한 마찰 속도의 임계점을 0.06m s⁻¹으로 설정했고(Fig. 1), 임계점 이하에서 측정된 야간 CO₂ 플럭스는 분석에서 제외하였다. 그리고, FLUXNET의 표준화 방법인 수정된 색인 목록 방법(Reichstein *et al.*, 2005)을 이용한 결측보충(gap-filling) 과정을 수행하였는데, 보리 재배기간의 CO₂ 결측보충률은 45%, 벼 재배기간의 CO₂ 결측보충률은 47%로 각각 조사되었다.

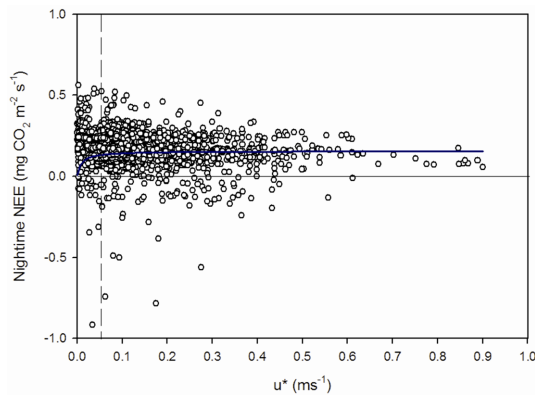


Fig. 1. Determination of the threshold friction velocity (u^*) from 20 October 2012 to 21 October 2013. The solid line represents a smoothed function fitted to the data. The dashed line represents the threshold below which the flux is lower. The u^* threshold for the site is 0.06 m s^{-1} .

2.6. CO₂ 플럭스(NEE, GPP, Re)의 분배

는 생태계와 대기간 CO₂의 순생태계 교환량(net ecosystem exchange, NEE)은 작물(벼/보리)의 광합성 동화작용에 의한 CO₂ 흡수량(gross primary production, GPP)과 작물 및 토양의 호흡에 의한 CO₂ 방출량(ecosystem respiration, Re)의 차이로 나타낼 수 있다(식 1).

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

Re는 작물 및 토양의 주간호흡과 야간호흡의 합으로 나타낼 수 있으며, 야간호흡의 계산식은 <식 2>와 같다.

$$F_{Re}(N) = A \exp(BT) \quad (2)$$

여기서, A와 B는 회귀분석에 의해 결정된 경험상수이고, B는 온도계수(Q_{10})로 $\ln(Q_{10})/10$ 으로 나타낸다. A는 야간지온이 0°C일 때의 호흡량, T는 야간지온을 각각 의미한다.

주간의 지온에 대한 생태학적 호흡량의 관계는 야간 호흡과 같다는 전제하에 야간호흡의 계산식에 주간의 지온을 대입하여 주간호흡량을 계산하였다(Saito *et al.*, 2005).

2.7. CH₄ 배출량의 측정

는 생태계의 CH₄ 배출량은 Gas Chromatograph (GC)-FID와 연동된 자동화 개폐 챔버 시스템[(Automatic

Open/Close Chamber(AOCC)]을 이용하였고, 1일 12회(2시간 간격) 측정하였다. AOCC는 챔버부, 펌프부, 작동제어부, 분석부 등 4부분으로 구성되어 있고, 챔버의 크기는 62×62×120cm(L×W×H)이다. 챔버 상단뿐만 아니라, 하단에도 자동 개폐문을 설치하여 비 측정 시간에는 챔버내부와 외부의 공기 순환이 원활하도록 제작하였다. 벼 재배시기는 주로 담수상태이기 때문에 샘플 공기의 높은 수분함량이 문제가 되는데, 본 연구에서는 샘플 공기의 수분을 2가지 방식(라인퍼지, 냉각)으로 제거하여, GC기기의 성능유지와 데이터 분석값의 재현성을 제고하였다. 챔버내부에는 온도 센서를 설치하여 챔버내부의 지온, 수온, 기온을 측정하였고, 수위센서도 설치하여 물의 깊이를 측정하였다. CH₄의 농도는 챔버 상·하단의 자동 개폐문을 닫은 후, 초기값과 30분 이후값을 각각 측정하는데, 이때 챔버내 온도도 함께 측정하였다. 이와 같이 측정된 자료를 활용하여 다음<식 3>과 같은 방법으로 메탄 배출량을 계산하였다(식 3).

$$F = p(V/A) \times (dC/273(273+dT)) \quad (3)$$

여기서 F는 CH₄배출량의 플럭스($\text{mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)이고, p는 챔버내부의 CH₄의 밀도(0.714 kg m^{-3})를 나타내며, V와 A는 챔버의 부피(m^3)와 챔버의 밀넓이를 나타낸다. dC는 측정시간동안 CH₄ 농도 증가를 나타내는 것으로, 측정시간동안 측정된 CH₄ 농도의 기온기로 계산한다. dT는 측정시간동안 챔버내부의 기온 변화를 의미한다(Yagi *et al.*, 1996).

III. 결 과

3.1. 환경요인 및 작물 성장량의 변화

2012년 보리 파종일(2012.10.20)부터 2013년 벼 수확일(2013.10.21)까지의 환경요인과 작물의 성장량의 변화를 시계열로 나타내면, Fig. 2와 같다. 보리와 벼 재배기간의 평균기온은 12°C이고, 동기간의 평균 일사량은 $17.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 관측되었다. 보리와 벼재배기간의 누적 강수량은 1,070mm로 평년(1,313)보다 적었고, 동기간의 강수일수도 100일로 평년(122일)보다 적게 관측되었다. 보리 군락의 LAI는 최대 $2.8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 까지 높아진 후 감소하였고, 벼 군락의 LAI는 최대 $4.9 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 까지 높아진 후 감소하는 경향을 나타냈다. LAI가 가장 높게 관측된 날짜(보리: 2013.5.9, 벼:

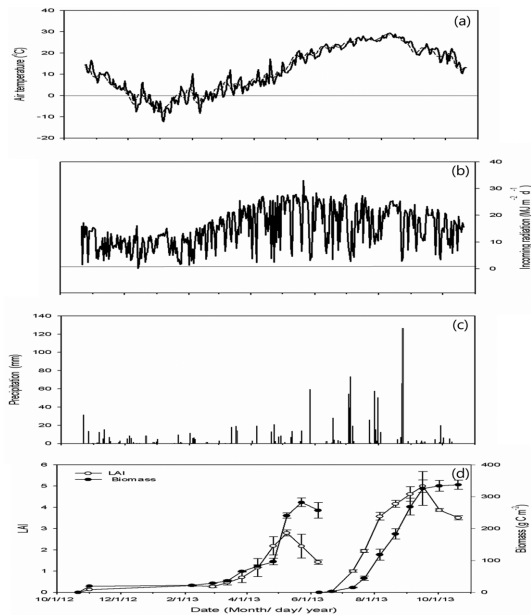


Fig. 2. Seasonal changes of meteorological and vegetative variables from 20 October 2012 to 21 October 2013. (a) Daily air temperature (solid line) and its 7-day moving average (dashed line), (b) daily incoming radiation (solar radiation), (c) daily precipitation, and (d) leaf area index (LAI) and biomass.

2013.8.21)는 작물의 출수기가 관측된 날짜(보리: 2013.5.5, 벼: 2013.8.15)와 유사하였다. 보리의 지상부 건물중은 파종후 생육초기에는 서서히 증가하다가 이듬해 3월부터 5월까지 급격히 증가한 후, 감소하는 경향을 나타냈고, 벼의 지상부 건물중은 모이앙부터 9월 중순까지는 급격히 증가한 후, 수확기까지는 조금씩 증가하는 것으로 조사되었다.

3.2. CO₂ 플럭스(GPP, NEE, Re)의 계절적 변화

보리와 벼 재배기간의 일별 GPP, NEE, Re의 계절적 변화는 Fig. 3과 같다. 보리재배기간의 경우, 보리 파종일(2012.10.20)부터 동년 11월 상순까지는 Re가 GPP보다 높아서, 이기간의 논 생태계는 CO₂의 발원(source)으로 작용하였으나, 11월 중순부터 12월 상순까지는 보리의 초기생육으로 논생태계는 CO₂의 발원에서 흡원(sink)으로 전환되었다. 12월 중순부터 이듬해 2월 중순까지는 보리의 생육정지기로 논 생태계는 다시 CO₂의 발원으로 작용하였고, 2월 하순부터 5월 상순까지는 광합성에 의한 보리 성장량의 증가로 GPP 및 NEE가 급격하게 증가하여 논 생태계는 CO₂의 발

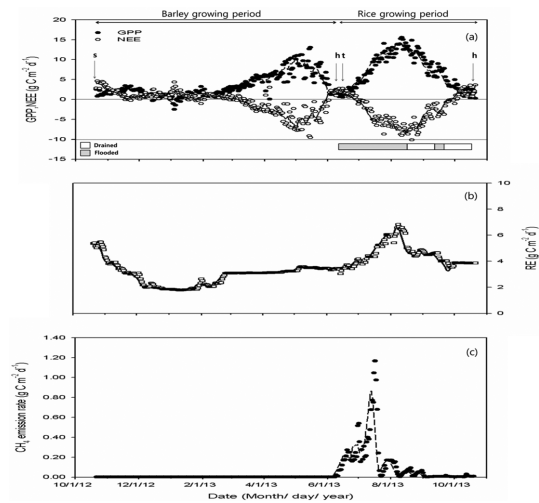


Fig. 3. Seasonal variations of daily gross primary production (GPP),ecosystem respiration (Re), net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and CH₄ emission from 20 October 2012 to 21 October 2013. The arrows represent the dates of the main field managements: barley sowing (s), barley and rice harvest (h), and rice transplanting (t). The horizontal bar denotes flooded (grey) and drained (white) soil condition.

원에서 흡원으로 전환되었다. LAI가 가장 높게 관측된 5월 9일에 GPP가 가장 높게(12.69 g C m⁻² d⁻¹) 측정되었다. 보리 수확전 1주일(2013.6.2)부터는 Re가 GPP보다 높게 측정되어 논 생태계는 다시 CO₂의 발원으로 평가되었다. 보리 수확후, 논 생태계는 토양호흡에 의해서 일평균 2.05g m⁻²의 탄소(C)를 대기중으로 배출하는 것으로 조사되었다.

벼 재배기간의 경우, 벼 이앙일(2013.6.1)부터 6월 말(28일)까지는 Re가 GPP보다 높게 측정되어 논 생태계는 CO₂의 발원으로 작용하였으나, 그 이후 GPP와 NEE는 벼 성장량의 증가와 더불어 8월 중순까지 급격히 증가하여, 논 생태계는 CO₂의 발원에서 흡원으로 전환되었다. 2013년 8월 26일(13.32g C m⁻² d⁻¹)에 가장 높은 GPP가 관측된 이후, 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 2013년 10월상순부터는 Re가 GPP보다 높게 측정되어 논 생태계는 다시 CO₂를 배출하는 것으로 평가되었다.

3.3. CH₄ 배출량의 계절적 변화

보리와 벼 재배기간의 일평균 CH₄ 배출량은 각각 단위면적당(m²) 1.15와 171.71mg 이었으며, 보리(233일)와 벼(135일) 재배기간의 누적된 CH₄ 배출량을 탄

소로 환산하면, m^2 당 각각 0.20와 17.26g C로 조사되어, 벼 재배기간의 CH_4 배출량이 더 많은 것으로 평가되었다. 벼 재배기간의 CH_4 배출량의 계절적 변화를 살펴보면, 모 이앙부터 6월 상순까지의 CH_4 배출량은 $0.02\sim 0.07g C m^{-2} d^{-1}$ 범위로 낮았지만, 2013년 6월 중순부터는 CH_4 배출량이 급격히 증가하여, 7월 16일에 가장 높은 CH_4 배출량($1.17g C m^{-2} d^{-1}$)이 관측되었다. 그 이후 배수기간(2013.8.16~9.15)에는 CH_4 배출량이 감소하는 경향을 나타냈다.

3.4. 일사량과 GPP의 관계

보리와 벼 재배기간동안 관측된 일사량과 GPP의 관계를 비선형 회귀식을 이용하여 분석하면, 각각의 생육시기마다 일사량이 증가할수록 GPP가 증가하는 것으로 나타났다. 보리의 생육정지기간(2013.2.4~2.10)에는 일사량의 증가에 따른 GPP의 증가 경향이 매우 낮았지만, 보리의 출수기가 관측된 기간(2013.5.1~5.7)에는 일사량의 증가에 따른 GPP의 증가 경향이 매우 높은 것으로 분석되었다(Fig. 4). 즉, LAI가 클수록 일사량의 증가에 따른 GPP의 증가율이 높은 것으로 평가되었다. 벼 생육기간의 일사량과 GPP의 관계도 보리와 마찬가지로, LAI가 클수록 일사량의 증가에 따른 GPP의 증가율이 높아지는 것으로 조사되었다.

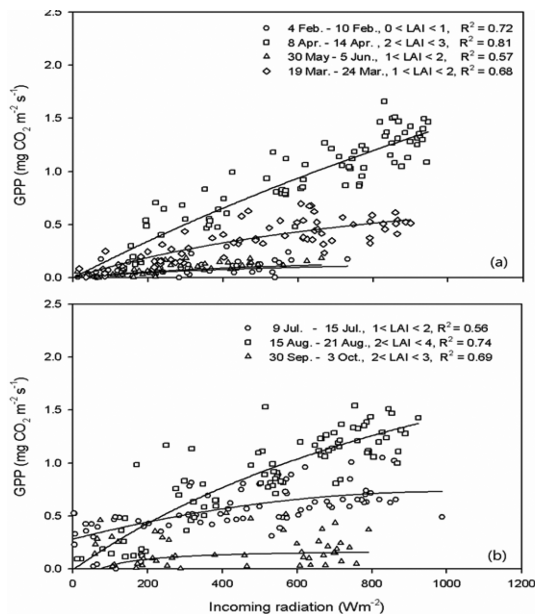


Fig. 4. Relationships between half-hourly gross primary production (GPP) and incoming radiation (solar radiation) during the barley (a) and rice (b) growing period, respectively.

다만, 벼 황숙기간(2013.9.30~10.3)은 분얼기간(2013.7.9~7.15)보다 LAI가 높았지만, 일사량의 증가에 따른 GPP의 증가율이 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 이와 같이 벼 황숙기간동안 GPP의 낮은 증가율은 엽록소 함량의 감소에 따른 광합성 효율의 저하로 해석된다(Soejima *et al.*, 1995).

3.5. 지온과 Re의 관계

보리와 벼 재배기간동안 관측된 지온과 Re의 관계를 비선형 회귀로 분석하면, 일반적으로 지온이 높아질수록 Re가 증가하는 것으로 나타났다(Fig 5). 벼 재배기간을 담수와 배수기간을 구분하여 지온과 Re의 관계를 분석하면, 지온이 높아짐에 따른 Re의 증가 경향이 담수보다는 배수기간에서 더 큰 것으로 분석되었다. 이는 담수기간 동안에는 벼논의 지표면이 물로 채워져 토양과 대기의 CO_2 교환이 억제된 반면에, 배수기간에는 CO_2 교환이 원활해져 토양호흡의 의한 탄소배출이 증가하였기 때문으로 해석되었다(Miyata *et al.*, 2000).

3.6. 순 생물상생산량(NBP)의 추정(연간 탄소수지)

보리 재배기간동안 논 생태계가 흡수한 총 탄소의 양인 GPP는 $782.7g C m^{-2}$ 이고, 이중에 Re로 $682.5g C m^{-2}$ 가 대기중으로 배출되는 것으로 분석되었다. 여기에 농작물의 수확으로 논 생태계 외부로 나간 보리 작물체의 탄소함량($272.8g C m^{-2}$)과 메탄의 형태로 대기로 배출되는 탄소함량($0.2g C m^{-2}$)을 포함하면,

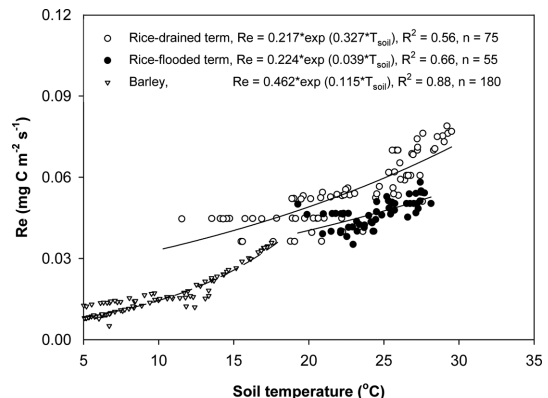


Fig. 5. Relationships between daily ecosystem respiration (Re) and soil temperature. Open triangles, open circles and closed circles show the relations of the Re and soil temperature in barley, rice (drained) and rice (flooded) growing period, respectively.

Table 2. Carbon budget (g C m^{-2}) of each cultivation period at the study site

Gain		Barley	Rice	Fallow	Total
GPP		782.7	931.2	0.0	1713.9
Loss	Re	682.5	557.1	41.2	1280.8
	Harvest	272.8	327.5	0.0	600.3
	CH ₄	0.2	17.3	0.0	17.5
	NEE(=Re-GPP)	-100.2	-374.1	41.2	-433.0
NBP(=Re+Harvest+CH ₄ -GPP)		172.8	-29.3	41.2	184.7

Note: Net ecosystem production (NEP), Gross primary production (GPP), Ecosystem respiration (Re), Net biome production (NBP)

보리 재배기간에 대기중으로 배출되는 총 탄소함량은 955.5g C m^{-2} ($682.5+272.8+0.2$)으로 분석되었다. 다음으로 벼 재배기간의 GPP는 931.2g C m^{-2} 인데, 이중에 Re의 형태로 557.1g C m^{-2} 가 대기중으로 배출된 것으로 분석되었다. 벼 수확시, 작물체의 탄소함량 (327.5g C m^{-2})과 CH₄의 형태로 배출되는 탄소의 함량 (17.3g C m^{-2})을 포함하면, 벼 재배기간동안 대기중으로 배출한 총 탄소함량은 901.9g C m^{-2} ($557.1+327.5+17.3$)으로 분석되었다. 따라서, 2012~2013년의 보리와 벼 재배기간의 순생물상 생산량인 NBP는 각각 -172.83g C m^{-2} 와 $+29.30\text{g C m}^{-2}$ 으로 산정되어, 보리 재배기간의 논 생태계는 대기로 탄소를 배출하였지만, 벼 재배기간의 논 생태계는 대기로부터 탄소를 흡수한 것으로 분석되었다. 여기에 휴경기간의 탄소배출량 (41.2g C m^{-2})을 포함하면, 2012~2013년 보리-벼 이모작 작부체계의 논 생태계는 총 184.7g C m^{-2} 탄소가 대기중으로 배출한 것으로 추정되었다(Table 2).

IV. 고 찰

전북 김제의 논 생태계 플럭스 관측사이트에서 측정된 2012~2013년보리 재배기의 누적 NEE는 -100.2g C m^{-2} 으로, 동일 사이트에서 측정된 2011~2012년 보리 재배기간의 누적 NEE(-348.0g C m^{-2} ; Min *et al.*, 2014) 보다 약 3.5배 낮게 조사되었다. 반면에 2013년 벼 재배기간의 누적 NEE는 -374.1g C m^{-2} 으로, 동일 사이트에서 측정된 2012년 벼 재배기간의 누적 NEE(-277.1g C m^{-2} ; Min *et al.*, 2013)보다 약 1.4배 높게 조사되었다. 이와 같이 동일 논 생태계에서 측정된 누적 NEE의 연간 차이는 농작물 생산량(건물중, 엽면적지수 등)과 환경요인의 연간 변동에

서 그 원인을 찾을 수 있다. 보리 재배기간의 경우, 2012~2013년 보리 수확시기의 지상부 건물체의 탄소함량은 257.3g C m^{-2} 으로, 2011~2012년 보리 수확시기의 지상부 건물체의 탄소함량(455.3g C m^{-2})에 비해 매우 낮았다. 또한, 2012~2013년 보리 월동기간의 일평균 NEE는 $+1.77\text{g C m}^{-2}$ 인데 반해, 2011~2012년 동일기간의 일평균 NEE는 -0.5g C m^{-2} 으로 조사되었는데, 이는 월동기간의 온도차이로 인한 생육량의 차이로 해석된다. 즉, 2012~2013년 보리의 월동기간의 평균기온은 -2.0°C 로 2011~2012년 동일기간의 평균기온(-1.3°C)보다 0.7°C 낮게 경과했으며, 이에 따라 2013년 3월 상순의 보리의 지상부 건물체의 탄소함량은 36.1g C m^{-2} 으로 2012년 3월 상순의 그것(65g C m^{-2})보다 매우 낮았다. 다음으로 벼 재배기간의 경우, 2013년 벼 수확시기의 지상부 건물체의 탄소함량은 357.3g C m^{-2} 으로 2012년 벼 수확시기(334.5g C m^{-2})보다 조금 높았지만, 2013년 벼 군락의 최대 LAI는 $4.97\text{m}^2\text{m}^{-2}$ 로 2012년($3.82\text{m}^2\text{m}^{-2}$)보다 매우 높게 조사되었다. 이는 벼 생육기간동안의 온도와 복사에너지의 차이로 일부 해석될 수 있다. 2013년 벼 생육기간동안의 평균기온과 복사에너지는 각각 23.1°C , $12.67\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 로, 2012년 동일기간의 평균기온(22.1°C)과 복사에너지($10.68\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)보다 더 높았던 것으로 조사되었다. 이와 같이 농작물 생산량과 환경요인의 연간 변동이 CO₂ 플럭스의 연간 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 조사되어, 앞으로는 이들의 상관성에 대한 통계적 분석이 추가될 필요성이 있다.

적 요

본 연구는 보리-벼 이모작 작부체계의 논 생태계에

설치한 개방형 CO₂ 플럭스시스템과 자동개폐식 챔버형 CH₄ 측정시스템에서 관측된 탄소관련 온실가스 자료와 작물 성장량자료를 활용하여 논 생태계의 연간 (2012.10.20~2013.10.21) 탄소수지를 분석하였다. 결론적으로 농작물의 생육인자와 환경인자는 CO₂의 순 생태계교환량(NEE)에 영향을 주는 것으로 분석되었고, CH₄ 배출량은 영농활동(특히 물관리)에 따라 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 2012~2013년 벼-보리 이모작 작부체계의 논 생태계에서 보리 재배기간에는 단위면적(m²)당 100.2g의 탄소를 흡수하고 벼 재배기간에는 m²당 374.1g의 탄소를 흡수하였지만, 휴경기간에는 토양호흡의 형태로 m²당 41.2g의 탄소를 배출하여 연간 총 433.1g m⁻²의 탄소를 흡수하는 것으로 분석되었다. 여기에 농작물의 수확에 따른 논 생태계의 탄소 배출량과 CH₄ 형태로 배출되는 탄소량을 포함한 연간 순생물상생산량(NBP)은 184.7g C m⁻²으로 추정되어, 보리벼 이모작 작부체계의 논 생태계는 탄소 발원인 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원농업과학기술 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: CO₂/heat fluxes in rice field: Comparative assessment of flooded and non-flooded fields in the Philippines. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**, 1737-1750.
- Bartlett, K. B., and R. C. Harris, 1993: Review and assessment of CH₄ emissions from wetlands. *Chemosphere* **26**, 211-230.
- Balogh, J., Z. Nagy, Sz. Foti, K. Pinter, Sz. Czobel, E. R. Peli, M. Acosta, M. V. Marek, Zs. Csintalan, and Z. Tuba, 2007: Comparison of CO₂ and H₂O fluxes over grassland vegetations measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber. *Photosynthetica* **45**(2), 288-292.
- Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, Ch. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, U. K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy, 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**(11), 2415-2434.
- Bhattacharyya, P., S. Neogi, K. S. Roy, and K. S. Rao, 2012: Gross primary production, ecosystem respiration and net ecosystem exchange in Asian rice paddy: an eddy covariance-based approach. *Current Science* **104**(1), 67-75.
- Bonneville, M. C., I. B. Strachan, E. R. Humphreys, and N. T. Roulet, 2008: Net ecosystem CO₂ exchange in a temperate cattail marsh in relation to biophysical properties. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 69-81.
- Campbell, C. S., J. L. Heilman, K. J. McInnes, L. T. Wilson, J. C. Medley, W. Guowei, and R. C. Douglas, 2001: Diel and seasonal variation in CO₂ flux of irrigated rice. *Agricultural and Forest Meteorology* **108**(1), 15-27.
- Clement, R. J., P. G. Jarvis, and J. B. Moncrieff, 2012: Carbon dioxide exchange of a Sitka spruce plantation in Scotland over five years. *Agricultural and Forest Meteorology* **153**, 106-123.
- Ferlan, M., G. Alberti, K. Eler, F. Bati, A. Peressotti, F. Miglietta, A. Zaldei, P. Simoncic, and D. Vodnik, 2011: Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **140**, 199-207.
- Field, C. B., J. T. Ball, and J. A. Berry, 1989: Photosynthesis: Principles and field techniques. In: R. W. Pearcy, H. A. Mooney, J. R. Ehleringer, and P. W. Rundel, editors, *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*, Chapman and Hall, London, 209-253.
- Hutchinson, G. L., and G. P. Livingston, 1993: Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In: L. A. Haper et al., editors, *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, 63-78.
- International Atomic Energy Agency, 1992: *Manual on measurement of methane and nitrous oxide emissions from agricultural organization of the United Nations and the International Atomic Energy Agency*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1-91.
- IPCC, 2007: *Climate change 2007: Mitigation, contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 168pp.
- Khalil, M., and R. J. Rasmussen, 1983: Sources, sinks and seasonal cycles of atmospheric methane. *Journal of Geophysical Research* **103**, 5131-5144.
- Lee, X., W. Massman, and B. Law, 2004: *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 250pp.
- McCaughey, J. H., M. R. Pejam, M. A. Arain, and D. A. Cameron, 2006: Carbon dioxide and energy fluxes from

- a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* **140**, 79-96.
- 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-barley double cropping paddy field of Gimje. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **15**(4), 273-281. (in Korean with English abstract)
- Min, S. H., K. M. Shim, Y. S. Kim, H. Hwang, M. P. Jung, and I. T. Choi, 2014: Seasonal variation of CO₂ exchange during the barley growing season at a rice-barley double cropping paddy field of Gimje. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(2), 137-145. (in Korean with English abstract)
- 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**(4), 287-303.
- 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. *Biogeosciences* **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**(9), 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 and Forest Meteorology* **135**, 93-109.
- Soejima, H., S. Tamizi, and I. Kuni, 1995: Changes in the chlorophyll contents of leaves and in levels of cytokinins in root exudates during ripening of rice cultivars Nipponbare and Akenohoshi. *Plant and Cell Physiology* **36**(3), 1105-1114.
- Takimoto, T., T. Iwata, S. Yamamoto, and T. Miura, 2010: Characteristics of CO₂ and CH₄ flux at barley-rice double cropping field in southern part of Okayama. *Japanese Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **66**(3), 181-191.
- Veenendaal, E. M., O. Kolle, P. A. Leffelaar, A. Schrier-Uijl, J. van Huissteden, J. D. van Walsem, F. Moller, and F. Berendse, 2007: CO₂ exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils. *Biogeosciences* **4**(6), 1027-1040.
- 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**(447), 85-100.
- Wilczak, J. M., S. T. Oncley, and S. T. Stage, 2001: Sonic anemometer tilts correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**(1), 127-150.
- Yagi, K., T. Haruo, K. Kenichi, and M. Katsuyuki, 1996: Effect of water management on methane emission from a Japanese rice paddy field: Automated methane monitoring. *Global Biogeochemical Cycles* **10**(2), 255-267.
- Yang, S. S., and H. L. Chang, 2001: Methane emission from paddy fields in Taiwan. *Biology and Fertility of Soils* **33**, 157-165.