

보리-벼 이모작지와 벼 단작지의 순 생물상생산량의 비교

심교문*, 민성현, 김용석, 정명표, 최인태
국립농업과학원 기후변화생태과

Comparison of NBP between Barley-rice Double Cropping Paddy and Rice Mono Paddy

K. M. Shim*, S. H. Min, Y. S. Kim, M. P. Jeong, and I. N. Choi
Climate Change & Agroecology Division, National Academy of Agricultural Science

I. 서 언

1년생 작물을 주로 재배하고 있는 논 생태계는 작물의 광합성에 의해서 대기 중의 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 대기 중으로 방출되기 때문이다. 따라서 에디공분산 방법으로 관측된 탄소교환량에 농작물의 수확에 따른 탄소배출량과 CH₄ 형태로 배출되는 탄소량을 함께 고려하는 순 생물상교환량(Net Biome Production, NBP)의 분석이 요구되고 있다.

본 연구는 에디공분산 방식과 자동개폐식 챔버 방식을 이용하여 보리-벼 이모작 작부체계의 논 생태계와 벼 단작 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 생태계와 벼 단작 논 생태계의 연간 NBP, 즉 연간 탄소수지를 산정하고 그 결과를 비교하기 위해서 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 지역의 개요

연구대상 지역은 전라북도 김제시 부량면 신용리 일대의 보리-벼 이모작과 벼 단작의 논으로 지형은 평평하고 균질하다. 토양층은 물 빠짐이 좋은 미사질 양토의 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. 에디공분산과 챔버 방식의 물질 플럭스 관측시스템을 보리-벼 이모작지와 벼

* Correspondence to : kmshim@korea.kr

단작지에 2011년과 2012년에 각각 구축하여 논 생태계의 CO₂ 교환량과 CH₄ 발생량을 지속적으로 측정하고 있다.

2.2. 미기상학적 방식의 플럭스 측정 및 보정

대기 중의 CO₂와 H₂O는 개방형 CO₂/H₂O 적외선 가스분석기로, 대기 중의 풍속과 온도는 3차원 초음파 풍속계로 초당 10회(10Hz) 측정하였고, 이들 데이터(풍속, 바람에 수송된 대기 중의 CO₂ 농도· H₂O 농도· 온도)의 30분 평균에 대한 편차를 공분산하여 30분 평균 물리량 플럭스를 계산하였다.

10Hz의 물리량 플럭스 원본자료와 30분 플럭스 평균자료는 자료기록기에 저장되며, CDMA 통신 모뎀을 이용하여 30분 평균자료를 실시간으로 수집하였다. 또한 2주 간격으로 현장에서 10Hz 플럭스 원본자료를 수집하여 분석에 활용하였다.

미기상학적 에디공분산법으로 측정된 원본 자료는 Eddy pro 프로그램을 활용하여 평면 맞추기 회전(PFR; planar fit rotation), 밀도변동 보정과정을 수행 후, 튀는 자료 제거를 진행하였다. 밤 시간 동안 측정된 30분 평균 플럭스와 지온자료를 활용한 비선형 통계법으로 생태적 호흡량(R_e : Ecological respiration)을 추정하였으며, 낮 시간 동안 측정된 30분 평균 플럭스 데이터는 PAR과의 모델링을 통하여 총 일차 생산량(GPP; Gross Primary Production)을 추정하였다.

2.3. 챔버 방식의 CH₄ 발생량 자동측정시스템 구축 및 CH₄ 발생량 측정

논 생태계의 CH₄ 발생량은 Gas Chromatograph(GC)-FID와 연동된 자동화 개폐 챔버 시스템 [(Automatic Open/Close Chamber(AOCC))]을 이용하여, 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 측정시간에는 챔버 내부와 외부의 공기 순환이 원활하도록 제작하였다. 챔버내부에는 온도 센서를 설치하여 챔버 내부의 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.

2.4. 벼/보리 생육조사

벼와 보리의 성장량 조사는 관측타워의 주풍향에 위치한 농가포장에서 2주 간격으로 수행하였다. 벼는 연속된 20주(15cm×30cm×20=9,000cm³)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.

2.5. 순 생물상생산량(NBP) 계산

벼 단작지와 보리-벼 이모작지의 순생태 교환량(NEE = -NEP)을 에디공분산 방식으로 관측하여 논 생태계가 흡수한 탄소량을 산정하였고, 관측된 NEE와 환경인자(지온, PAR 등)의 통계적 분석을 통하여 농작물의 광합성에 의해 흡수된 총 탄소량(GPP)과 호흡으로 배출된 총 탄소량(R_e)을 추정하였다. 메탄으로 배출된 탄소량(F_{CH_4})은 챔버 방식으로 측정하였고 수확기의 농작물의 탄소량(Biomass)은 건물중에 탄소함량을 곱하여 계산하였다. NBP는 작물의 광합성 과정에서 흡수된 탄소량(GPP)에서 작물의 호흡으로 배출되는 탄소량(R_e)과 메탄으로 배출되는 탄소량 및 농작물의 탄소량(Biomass)을 감해서 계산할 수 있는 데, 그 식은 다음과 같다.

$$NBP = GPP - (R_e + F_{CH_4} + Biomass) \quad (1)$$

III. 결 과

보리-벼 이모작의 논 생태계의 경우, 보리 재배기간 동안 논 생태계가 흡수한 총 탄소의 양인 GPP는 $782.7g C m^{-2}$ 이고, 이중에 R_e 로 $682.5g C m^{-2}$ 가 대기 중으로 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, 보리 재배기간에 대기 중으로 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 R_e 의 형태로 $557.1g C m^{-2}$ 가 대기 중으로 배출된 것으로 분석되었다. 벼 수확시, 작물체의 탄소함량($327.5g C m^{-2}$)과 CH_4 의 형태로 배출되는 탄소의 함량($17.3g C m^{-2}$)을 포함하면, 벼 재배기간 동안 대기 중으로 배출한 총 탄소함량은 $901.9g C m^{-2}(557.1+327.5+17.3)$ 으로 분석되었다. 따라서 보리와 벼 재배기간의 순생물상 생산량인 NBP는 각각 $-172.83g C m^{-2}$ 와 $+29.30g C m^{-2}$ 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, 보리-벼 이모작 작부체계의 논 생태계는 총 $184.7g m^{-2}$ 탄소가 대기 중으로 배출한 것으로 추정되었다(Table 1).

벼 단작의 논 생태계의 경우, 휴경기간 동안 논 생태계가 흡수한 총 탄소의 양인 GPP는 $361.1g C m^{-2}$ 이고, 이중에 R_e 의 형태($558.6g C m^{-2}$)와 CH_4 의 형태($2.6g C m^{-2}$)로 총 $561.2g C m^{-2}$ 의 탄소가 대기 중으로 배출되는 것으로 분석되었다. 반면에, 벼 재배기간의 GPP는 $1385.3g C m^{-2}$ 인데, 이중에 R_e 의 형태로 $801.3g C m^{-2}$ 가 대기 중으로 배출된 것으로 분석되었다. 벼 수확 시, 작물체의 탄소함량($561.8g C m^{-2}$)과 CH_4 의 형태로 배출되는 탄소의 함량($14.0g C m^{-2}$)을 포함하면, 벼 재배기간 동안 대기 중으로 배출한 총 탄소함량은 $1377.2g C m^{-2}(801.3+561.8+14.0)$

으로 분석되었다. 벼 단작의 논 생태계에서 순생물상 생산량은 휴경기간과 벼 재배기간에 각각 -197.5g C m^{-2} 과 $+8.1\text{g C m}^{-2}$ 으로 산정되어, 총 189.4g C m^{-2} 의 탄소를 대기 중으로 배출하는 것으로 분석되었다(Table 2).

Table 1. Carbon budget(g C m^{-2})of each cultivation period in barley-rice double cropping paddy field

		Barley	Rice	Fallow	Total
Gain	GPP	782.7	931.2	0.0	1713.9
	Re	682.5	557.1	41.2	1280.8
Loss	Harvest	272.8	327.5	0.0	600.3
	CH4	0.2	17.3	0.0	17.5
NEE(=Re-GPP)		-100.2	-374.1	41.2	-433.0
NBP(=Re+Harvest+CH4-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)

Table 2. Carbon budget(g C m^{-2})of each cultivation period in rice mono paddy field

		Rice	Fallow	Total
Gain	GPP	1385.3	361.1	1746.4
	Re	801.3	558.6	1359.9
Loss	Harvest	561.8	0.0	561.8
	CH4	14.0	0.0	14.0
NEE(=Re-GPP)		-584.0	197.5	-386.5
NBP(=Re+Harvest+CH4-GPP)		-8.2	197.5	189.3

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

벼 단작과 벼-보리 이모작의 논 생태계의 연간 순 생물상생산량은 서로 비슷한 것으로 분석되었고, 논 생태계는 두 작부체계 모두에서 대기 중으로 탄소를 배출한 것으로 평가되었다.

감사의 글

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

인용문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.