

Research Paper

에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 이용한 국내외 산림과 농업 생태계 탄소 흡수량 분석

이보라* · 강완모** · 김충기** · 김지은** · 이창훈**

바이로이트대학교*, 한국환경정책·평가연구원**

Estimating carbon uptake in forest and agricultural ecosystems of Korea
and other countries using eddy covariance flux data

Bora Lee* · Wanmo Kang** · Choong-Ki Kim** · Gieun Kim** · Chang-Hoon Lee**

University of Bayreuth*, Korea Environment Institute**

요약 : 탄소 흡수원 조성과 같은 토지이용과 관련한 온실가스 감축대안 수립을 위해 다양한 생태계 시스템에서의 온실가스 잠재 흡수량 평가가 요구된다. 이 연구에서는 에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 활용한 순생태계교환량(Net Ecosystem Exchange: NEE)으로 국내 산림 생태계와 농경지 생태계에서의 탄소 흡수 능력을 추정하였다. 또한 우리나라와 유사한 기후조건외 국외 플럭스 타워 자료를 활용하여 국내 생태계 유형별 탄소 수지 추정결과와 비교분석하였다. 에디 공분산 기법을 이용한 산림과 농경지의 NEE 분석 결과, 우리나라의 산림에서는 연간 $-31 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 에서 $-362 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 농경지 생태계에서는 작물 재배 기간 동안 $-210 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 에서 $-248 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 의 값을 나타내 산림뿐만 아니라 농경지 생태계도 탄소 흡수 기능이 있음을 확인할 수 있었다. 산림의 경우 임상에 따라 시기별로 서로 다른 탄소 흡수 양상을 보였는데, 활엽수림은 늦봄과 초여름, 초가을에, 침엽수림은 봄과 초여름, 가을중순에 탄소 흡수 능력이 컸다. 또한 숲의 나이가 어리고, 활엽수나 침엽수로만 구성된 단순림보다 혼효림이 더 높은 탄소 흡수 능력을 가지고 있었다. 농작물의 성장기간 동안의 탄소 흡수량은 비트가 가장 컸고, 그 다음은 겨울밀, 옥수수, 벼, 감자, 콩 순으로 나타났다. 이러한 결과들은 향후 산림 및 농경지에서의 탄소저감 정책수립과정에 있어 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 탄소 흡수원, 에디 공분산 플럭스 타워, 플럭스넷, 산림, 농경지, 순생태계교환량

First Author: Bora Lee, Dept. of Plant Ecology, University of Bayreuth, Universitaetsstr. 30, Bayreuth 95440, Germany, Tel: +49-151-70843490, E-mail: puplebr@gmail.com

Corresponding Author: Wanmo Kang, Environmental Policy Research Group, Korea Environment Institute, Bldg B, 370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea, Tel: +82-44-415-7007, E-mail: kangwanmo@gmail.com

Co-Authors: Choong-Ki Kim, Environmental Policy Research Group, Korea Environment Institute, Bldg B, 370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea, E-mail: ckkim@kei.re.kr

Gieun Kim, Environmental Policy Research Group, Korea Environment Institute, Bldg B, 370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea, E-mail: gekim@kei.re.kr

Chang-Hoon Lee, Environmental Policy Research Group, Korea Environment Institute, Bldg B, 370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea, E-mail: chlee84@kei.re.kr

Received : 9 January, 2017. Revised: 2 March, 2017. Accepted: 31 March, 2017.

Abstract : Measurements of net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ based on the eddy covariance technique provide reasonable carbon balance estimates in response to local environmental conditions. In South Korea, the forest ecosystems cover approximately 64% of the total area, thereby strongly affecting regional carbon balances. Cultivated croplands that cover about 17% of the total area should also be considered when calculating the carbon balance of the country. In this study, our objectives were (a) to quantify the range and seasonal variation of NEE at forest ecosystems, including deciduous, coniferous, and mixed forests, and agricultural ecosystems, including rice paddies and a potato field, in South Korea and (b) to compare NEE at ten Fluxnet sites that have the same or similar ecosystems as found in South Korea. The results showed that the forest and agricultural ecosystems were carbon sinks. In Korea, NEE at the forest ecosystems varied between -31 and -362 gC/m²/yr, and NEE at the croplands ranged from -210 to -248 gC/m²/growing season. At the deciduous forest, NEE reached low values in late spring, early summer, and early autumn, while at the coniferous forest, it reached low values in spring, early summer, and mid autumn. The young mixed forest was a much stronger carbon sink than the old-growth deciduous and coniferous forests. During each crop growing season, beet had the lowest NEE value within six crops, followed by winter wheat, maize, rice, potato, and soybean. These results will be useful for designing and applying management strategies for the reduction of CO₂ emissions.

Keywords : Carbon Sink, Eddy-Covariance Flux Tower, Fluxnet, Forest, Agriculture, Net Ecosystem Exchange

I. 서론

1992년에 체결된 유엔 국제기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) 이후, 온실가스 감축이 지구 생태계 및 인간 생활 유지를 위한 중요한 과제로 떠올랐다. 1997년에 채택된 교토의정서에서 우리나라는 개발도상국으로 분류되어 선진국에만 부과되는 온실가스 감축 1차 의무 대상국에서 제외되었고 자발적인 온실가스 감축노력을 기울여 왔다. 그러나 2020년 이후부터 선진국 및 개도국이 함께 기후 변화에 대처해야 한다는 2015년 파리 협정(Paris Agreement)에 따라 우리나라 역시 적극적인 온실가스 감축활동과 대응정책 수립이 시급한 실정이다.

산림의 탄소 흡수 및 저장 기능을 기반으로 한 탄소 흡수원(Carbon Sink)의 활용이 국내 온실가스 감축을 위한 효과적인 대안으로 제시되고 있다. 탄소 흡수원 조성과 같은 온실가스 감축 대안 수립을 위해 적절한 토지이용과 관련한 온실가스 잠재 흡수량 평가가 요구된다. 산림뿐만 아니라 흡수량이 많을 것

로 예상되는 농경지 등을 대상으로 일관성 있는 방법론으로 탄소 흡수 및 배출에 대한 신뢰성 있는 정량 분석과 생태계 유형별 특성을 고려한 비교분석이 선행되어야 한다(Ciais et al. 2009; Ceschia et al. 2010). 특히, 농경지로 분류되는 토지피복은 전 지구적으로 약 38%의 면적을 차지하기 때문에 기후변화 대응에 있어 농경지의 탄소 순환에 대한 이해가 반드시 필요하다. 이는 탄소 흡수원을 고려한 환경영향평가 및 의사결정지원을 위한 과학적 정보로서 토지이용계획의 적정성 제고에 필수적이다.

생태계 탄소 수지(Carbon Balance) 분석 방법론은 생물학적 측정법(Son et al. 2004)과 에디 공분산 기법을 이용한 탄소 플럭스 측정법(Saigusa et al. 2005), MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상 등을 활용한 원격탐사 기법(Running et al. 2004), 생·물리학적 모델링 기법(Ito & Oikawa 2002; Yoo et al. 2012) 등이 있다. 이런 방법 중 산림과 농경지, 초지, 습지 등 다양한 육상 생태계를 대상으로 한 신뢰도 높은 탄소 수지 측정법으로 생태계와 대기 간 탄소 순환을 측정하는 첨단

의 미기상학적 에디 공분산법이 널리 활용되고 있다 (Wang & Polglase 1995; Baldocchi et al, 1996). 에디 공분산 방법은 지표에서의 에너지와 물질의 순환을 정량화하는 미기상학적 방법으로 지표-대기 간의 물질 및 연직 에너지 플럭스와 그 교환 과정에서 중요한 역할을 하는 난류의 구조를 밝힘으로써 순생태계 교환량, 총일차생산량, 증발산량 등을 추정할 수 있다. 현재 650개가 넘는 에디 공분산 기반의 플럭스 타워가 아시아 및 전 지구 플럭스 관측망인 AsiaFlux (<http://www.asiaflux.net/>)와 Fluxnet(<https://fluxnet.ornl.gov/>) 체계 아래 다양한 생태계에 설치되어 있다. 에디 공분산 기반의 플럭스 타워를 통해 순 생태계 이산화탄소 교환량(Net ecosystem CO₂ exchange)을 관측하여 생태계에서의 탄소 흡수량과 배출량을 추정할 수 있다. 나아가 플럭스 타워 자료를 활용한 대기-생태계 간의 탄소의 흐름과 과정기반 생태계 모형(Process-based Ecosystem Model)의 결합을 통해 생육 기간과 기후 변화, 토지 이용, 지형 등에 따른 생태계 탄소 수지의 시·공간 변화를 분석하고 예측할 수 있다(White et al, 2000; Law et al, 2004; Owen et al, 2007). 또한 플럭스 타워와 모형, 인공위성 영상의 결합은 탄소 수지의 업스케일링(up-scaling)을 가능하게 하여 지역 및 대륙 간, 그리고 전 지구적 단위의 탄소흐름을 파악하게 해주고, 이것은 플럭스 타워 기법의 공간적 제한을 극복하는데 도움을 주고 있다(Li et al, 2008; Wu et al, 2009; Ogotu et al, 2013). 국내 연구 사례에서도 수문, 생지화학 모형과 인공위성 영상을 에디 공분산 기법의 자료와 결합하여 국내 생태계 유형에 맞게 모수화하는 과정과 모형개선, 인공위성 영상의 알고리즘 개발이 진행되고 있다(Lee et al, 2007; Shin et al, 2012; Ahn et al, 2013). 이러한 연구들을 바탕으로 생태계 유형별 탄소 수지 현황에 대한 종합적인 분석과 미래 시나리오에 따른 추이 예측이 가능하며, 이는 좀 더 정확한 생태계 탄소 흡수량 산정에 기여할 수 있을 것이다.

대기-생태계 간 탄소순환에 있어 순일차생산량(Net Primary Production: NPP)과 순생태계생산량(Net Ecosystem Production: NEP)이 생태계 기후

조절 기능의 주요 평가지표로 활용되고 있다. NPP는 식물이 광합성을 통해 생산한 총 유기물의 양인 총일차생산량(Gross Primary Production: GPP)에서 식물의 성장과 유지에 사용된 호흡량(Autotrophic Respiration: R_a)을 뺀 값이다. NEP는 NPP에서 유기물을 분해하는 종속영양생물의 호흡(Heterotrophic Respiration: R_h)을 제한 값이다. 순생태계교환량(Net Ecosystem Exchange: NEE)은 NEP와 절대값이 같지만 부호가 반대다. NEE는 탄소 흡수를 음수로, NEP는 양수로 표현한다. NEE는 매년 새로 성장하는 나뭇잎과 잔뿌리, 동일 해에 분해되지 않은 낙엽 등의 탄소 흐름을 고려한 값이다. 한 해 동안 발생 및 소비되는 탄소량 지표인 NPP보다 생태계의 회전을 반영할 수 있는 NEE에 대한 이해가 장기적인 탄소 흐름을 파악하는 데 있어 중요하다(Kirschbaum et al, 2001).

본 연구에서는 에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 활용하여 국내 산림 생태계(활엽수, 침엽수 및 혼효림)와 농경지 생태계(논, 감자 등)에서의 탄소 흡수 능력을 추정하였다. 또한 우리나라와 유사한 기후조건의 국외 플럭스 타워 자료를 활용하여 국외의 산림 및 농경지 생태계에서는 어느 정도의 순생태계 교환량이 관측되는지 알아보고, 이를 국내 생태계 유형별 탄소 수지 추정결과와 비교분석하였다.

II. 연구방법

1. 연구 대상 및 지역

Fluxnet 네트워크는 IGBP(the International Geosphere-Biosphere Programme) 토지피복분류를 사용하여 산림, 농경지, 도시, 초지 등을 구분한다. IGBP 토지피복분류에 의하면 국내의 산림 생태계는 혼효림과 활엽수림으로 분류되지만, 실제 생태계 유형은 IGBP 토지피복분류와 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 각 플럭스 타워의 자료 관리자가 제공하는 생태계 유형을 우선적으로 사용하였다.

우리나라의 산림 생태계로 광릉 활엽수림과 침엽수림(경기도 포천시 소흘읍의 광릉 국립수목원에 위치), 설마천 혼효림(경기도 파주시 적성면 마지리)와

설마리에 위치)에 설치된 플릭스 타워의 관측자료를 AsiaFlux에서 제공 받았다.

우리나라의 농경지에서 주로 재배되는 노지 작물은 벼, 감자, 보리, 무, 배추 등으로 이들 주요 작물 중 벼와 감자 경작지에서 측정된 에디 공분산 자료를 사용하였다. 측정 지역과 작물은 전라남도 해남군 해남읍의 논과 강원도 양구군 해안면의 논과 감자 경작지이다.

국의 자료는 기후 및 지형, 임상 등의 조건이 우리나라와 비슷한 지역을 선택하였다. 기후대의 구분은 KGCC(Köppen-Geiger climate classification)에 따른다. KGCC의 기후 분류에 따라, 대기후 분류는 C(온난 기온, warm temperature)와 D(눈, snow), 강수는 f(높은 습도, fully humid)와 w(건조 겨울, winter dry), m(장마, monsoonal), 기온은 a(뜨거운 여름, hot summer)와 b(따뜻한 여름, warm summer)로 나뉜다. 우리나라의 기후는 크게 Dwa(눈, 건조한 겨울, 뜨거운 여름, snow, winter dry, hot summer), Cfa(온난 기온, 높은 습도, 뜨거운 여름, warm temperature, fully humid, hot summer), Cwa(온난 기온, 건조한 겨울, 뜨거운 여름, warm temperature, winter dry, hoy summer), Dfa(눈, 높은 습도, 뜨거운 여름, snow, fully humid, hot summer) 등 4가지 기후로 분류된다. 국외 비교 지역을 선택할 때, 우리나라의 기후 분류에 속하거나 유사한 지역으로 일본, 미국, 그리고 프랑스의 산림 생태계를 선택하였다.

국의 농경지 생태계 자료의 경우 Lee (2015)의 자료들을 참고하면서, 우리나라에서 재배되는 작물과 같거나 비슷한 작물, 혹은 국제적으로 중요한 위치를 가지는 작물을 선택하여 비교하였다. 벨기에 론제(Lonze)에서 재배되는 비트(Beet)는 우리나라 무와 비슷한 생장 패턴 및 특성을 보여 무의 대체 비교 종으로 선택되었다. 우리나라의 주요 식량작물로서 강원도와 충청 지역에서 많이 재배되는 옥수수, 콩 또한 선택되었다. 겨울밀은 우리나라에서 재배되지 않으나, 전 세계적으로 수요량이 많은 작물로서 우리나라의 주요 작물들과 비교하여 어느 수준의 순생태계 교환량이 관측되는지 알아보기 위한 참고작물로 추

가하였다. 연구에서 활용된 국내외 에디 공분산 플릭스 타워 관측지역 정보는 Table 1과 같다.

2. 에디 공분산 자료 처리

각 플릭스 타워에서 10Hz 또는 20Hz 샘플링 속도로 기록된 에디 공분산 자료는 30분 단위로 평균된 자료이고, 기기 보정과 오작동, 품질관리, 전원 등의 요인으로 결측이 발생할 수 있다(Kwon et al, 2009). 따라서 Reichstein et al. (2005)가 제안한 표준화 기법과 이를 Papale et al. (2006)이 일부 수정한 방법으로 코딩된 R-Package “REddyProc”를 활용하여 공백자료 채우기, 밤 시간 자료 보정, 이상치(outlier) 처리 등을 하였다(Reichstein & Moffat 2014). 공백 자료의 경우 주변자료샘플(Marginal Distribution Sample, MDS, 또는 Look-up-table)방법으로 비슷한 조건을 가지는 7~14일 간격의 평균값으로 채웠다(Reichstein et al, 2005). 에디 공분산 자료의 특성상 활성화된 난류를 측정한다는 전제가 있으나 난류가 약하거나 발생하지 않는 경우, 예를 들면 밤 시간 동안에 측정된 난류에 기반 한 생태 호흡량 자료는 그 불확실성이 높아진다. 이러한 난류의 불확실성 정도를 평가하기 위해 마찰속도 임계점(u^* threshold)을 추정 후, 활용하기에 부적합한 데이터를 결정하였다. 이 보정은 온도 함수에 대해 관측된 밤 시간 동안의 생태 호흡량의 과소평가를 정량화하여 과소평가되는 난류의 기준이 되는 마찰 속도 임계점을 찾아내서 이 임계점보다 낮은 측정값은 함수값으로 대신하는 방식이다(Papale et al, 2006). 이 계산에 사용되는 태양복사의 임계점은 $<10 \text{ Wm}^2$ 이다. 이러한 과정으로 보정된 30분 단위의 에디 공분산 자료를 일 단위 및 연 단위로 환산하였다.

연구 대상지역의 플릭스 관측자료는 Fluxnet 또는 각 지역 네트워크 홈페이지에서 제공 받았다. AsiaFlux에서 품질 제어(quality control)된 자료를 받아 Papale et al. (2006)의 알고리즘을 바탕으로 자료를 처리하여 우리나라의 광릉과 설마천, 일본의 다카야마와 모시리, 후지요시다에서의 순생태계교환량을 계산하였다. 미국의 산림 및 농경지는

Table 1. Characteristics of flux tower sites used in this study. T_a is average annual temperature, and P is total annual precipitation.

Site name (site code)	Year	Vegetation type	Climate type	Site information			Meteorological condition		Tree species/Crop type	Stand age
				Country	Coordinates	Elevation (m)	T_a (°C)	P (mm)		
Gwangneung (KR-GDK)	2006, 2008	Deciduous forest	Dwa	South Korea	37.75 N 127.15 E	260	11.5	1,332	<i>Quercus sp.</i> , <i>Carpinus sp.</i> , <i>Exonymus oxyphyllus</i> , <i>Cornus kousa</i>	80-200
Gwangneung(KR-GCK)	2007-2008	Coniferous forest	Dwa	South Korea	37.75 N 127.16 E	128	11.5	1,332	<i>Abies holophylla</i> , <i>Cornus controversa</i> , <i>Morus alba</i>	80-200
Seolmacheon (KR-SMIK)	2008	Mixed forest	Dwa	South Korea	37.94 N 126.95 E	293	11.5	1,210	<i>Quercus sp.</i> , <i>Pinus koraiensis</i>	20-40
Takayama (JP-TKY)	2000-2007	Deciduous forest	Dfb	Japan	36.15 N 137.42 E	1,355	6.5	2,275	<i>Betula sp.</i> , <i>Quercus crispula</i> , <i>Sasa senanensis</i>	50
Fujiyoshida (JP-FYJ)	2000-2008	Coniferous forest	Dfb	Japan	35.45 N 138.77 E	1,043	10.1	1,483	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Ilex pedunculosa</i>	90
Moshiri (JP-MBF)	2004-2005	Deciduous forest	Dfb	Japan	44.38 N 142.32 E	585	3.3	1,409	<i>Quercus sp.</i> , <i>Acer sp.</i> , <i>Betula sp.</i> , <i>Kalopanax septemlobus</i> , <i>Tilia japonica</i> , <i>Abies sachalinensis</i> , <i>Picea glehnii</i>	30
University of Michigan Biological Station (US-UMB)	2000-2010	Deciduous forest	Dfb	U.S.	45.56 N -84.71 E	234	5.8	803	<i>Populus grandidentata</i> , <i>Populus tremuloides</i>	90
Morgan Monroe forest (US-MMS)	2000-2010	Deciduous forest	Cfa	U.S.	39.32 N -86.41 E	275	10.9	1,032	<i>Sassafras albidum</i> , <i>Quercus velutina</i>	60-80
Fontainebleau (FR-Fon)	2005-2010	Deciduous forest	Cfb	France	48.48 N 2.78 E	103	10.2	720	<i>Quercus sp.</i> , <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Pinus sylvestris</i>	250-400
Hesse forest (FR-Hes)	2000-2006	Deciduous forest	Cfb	France	48.67 N 7.06 E	300	9.2	793	<i>Fagus sylvatica</i>	46
Haean (KR-HAR)	2010	Rice paddy	Dwa	South Korea	38.29 N 128.13 E	446	8.5	1,577	Rice	-
Haean (KR-HAP)	2010	Dry cropland	Dwa	South Korea	38.28 N 128.12 E	440	8.5	1,577	Potato	-
Haenam (KR-HFK)	2008	Rice paddy	Cfa	South Korea	37.94 N 126.95 E	14	13.3	1,300	Rice	-
Mase (JP-Mas)	2002-2005	Rice paddy	Cfa	Japan	36.05 N 140.03 E	13	13.7	1,200	Rice	-
Lonzee (BE-Lon)	2004-2008	Dry cropland	Cfb	Belgium	55.55 N 4.74 E	165	10.8	800	Beet, winter wheat, potato	-
Nebraska (US-Ne3)	2002-2010	Dry cropland	Dfa	U.S.	41.18 N -96.44 E	362	10.1	784	Soybean, maize	-

* Climate type according to Köppen-Geiger climate classification (KGGC) system: Dwa is snow, winter dry, and hot summer; Dfb is snow, fully humid, and warm summer; Dfb is warm temperature, fully humid, and hot summer; Cfb is warm temperature, fully humid, and warm summer; and Dfa is snow, fully humid, and hot summer.

AmeriFlux, 프랑스 산림과 벨기에의 농경지는 CarboEurope, 일본 농경지는 JapanFlux에서 순생태계교환량 값을 제공받았다. 한국의 양구군 해안면 농경지는 Zhao & Lüters (2012)에서 처리된 자료를 받아 분석하였다.

광릉 활엽수림의 경우, 2007년 자료는 1월부터 9월까지만 기록되어 있어 연간 NEE를 계산하기에 부적합하였다. 광릉 침엽수림의 2007년 자료에는 강수량이 측정되어 있지 않아 가까운 기상대인 동두천 기상대의 강수량을 사용하였다. 설마천 혼효림의 경우, 총복사량이 측정되지 않아 같은 해 광릉 활엽수림의 총복사량을 활용하였다. 농경지의 경우 작물이 논과 밭에 있는 성장 시기만을 대상으로 NEE를 산정하였다.

III. 결과 및 토의

1. 산림 생태계의 NEE

우리나라 광릉 활엽수림(KR-GDK)에서의 연간 NEE는 2006년에 $-31 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 2008년에 $-274 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 였다(Table 2). 2006년 강수량은 평년보다 높았으며, 특히 비가 연속적으로 내린 날이 많고 봄철의 강수 빈도가 2008년보다 높았다. 이러한 강수의 영향은 식생의 광합성량을 감소시키고 호흡량을 증가시켜 이 기간의 산림은 이산화탄소의 공급원으로 작용하게 된다. 이와 관련하여 2008년 봄철의 광릉 활엽수림 NEE 값이 2006년 보다 낮은 것을 확인할 수 있다(Figure 1A, 1B). 광릉 침엽수림(KR-GCK)의 연간 NEE는 2007년에 $-222 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$

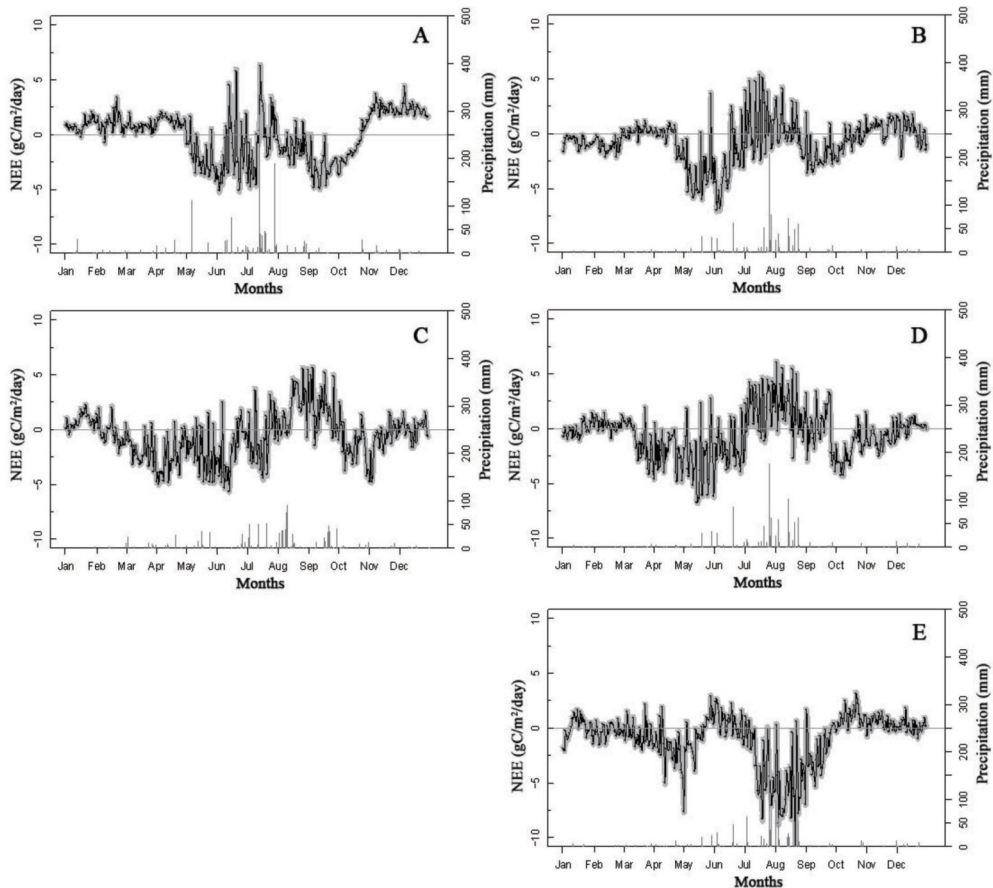


Figure 1. Daily variation and uncertainty of NEE values with precipitation of the forest sites from 2006 to 2008; A. Gwangneung Deciduous forest (KR-GDK), 2006, B. KR-GDK, 2008, C. Gwangneung Coniferous Forest (KR-GCK), 2007, D. KR-GCK, 2008, and E. Seolmacheon Mixed Forest (KR-SMK), 2008, in South Korea.

(2007년), 2008년에 $-193 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 였다(Table 2). 광릉 침엽수림은 대략 3월부터, 활엽수림은 이보다 늦은 대략 5월부터 탄소 흡수량이 많아지는 것으로 나타났다(Figure 1B, 1D). 활엽수림과 침엽수림은 겨울과 이른 봄까지 주로 탄소의 공급원으로 작용하였다. 한여름(7~8월)에는 침엽수림보다 활엽수림의 탄소 흡수 능력이 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다(Figure 1B, 1D), 활엽수림의 경우 9월에 침엽수림은 10월에 탄소 흡수량이 다시 증가하는 것을 볼 수 있다(Figure 1).

설마천 혼효림(KR-SMK)은 광릉의 활엽수 · 침엽수림보다 낮은 NEE 값($-362 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$)을 보였다(Table 2). 특히 여름철 NEE는 광릉 활엽수림이나 침엽수림보다 약 $3 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ 낮은 값을 보인다. 이러한 양상은 임령과 임상의 두 가지 측면에서 해석할 수 있다. 첫째, 설마천 혼효림은 광릉보다 어린 숲으로 임령이 낮은 산림이 높은 산림보다 더 큰 탄소 흡수 능력을 갖는다고 할 수 있다. 둘째, 활엽수에 비해 침엽수의 빠른 개엽시기와 그에 따른 이른 광합성의 시작 등 임상 간의 식물계절학적 차이가 있는데 (Ottander & Öquist 1991; Richardson et al, 2010), 설마천 혼효림은 성장을 위해 필요한 자원 활용 측면에서 단일 임상으로 된 산림보다 더 효율적으로 성장하며 상대적으로 더 높은 탄소 흡수량을 가질 가능성

이 있다. 본 연구결과만을 가지고 임령과 임상의 영향을 밝히기에는 한계가 있어, 임령과 임상의 조합에 따른 숲의 탄소 흡수량 차이를 명확하게 밝히기 위한 향후 추가 연구가 필요하다.

일본 활엽수림(JP-TKY, JP-MBF)의 경우 $-225 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 에서 $-488 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 의 연간 NEE 값을 보이며, 임령은 우리나라의 활엽수림보다 약 100년 이상 어린 30년에서 50년 사이이다(Table 1, 2). 일본 모시리 활엽수림(JP-MBF)의 경우 다카야마 활엽수림(JP-TKY)보다 약 20년 어린 산림이다. 모시리 활엽수림의 2004년과 2005년 연간 NEE가 각각 $-488 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, $-432 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 다카야마 활엽수림의 2004년과 2005년 연간 NEE는 각각 $-225 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, $-404 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 으로 어린 모시리 활엽수림이 다카야마 활엽수림보다 탄소 흡수 능력이 더 컸다. 일본의 침엽수림의 경우 $-154 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 에서 $-315 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 의 연간 NEE 값을 보인다. 이는 활엽수림보다 전체적으로 높은 값이긴 하지만, 임령 또한 90년으로 더 오래된 산림임을 감안해야 한다. 미국의 활엽수림 두 곳은 임령은 비슷하였지만, 연평균 온도와 강수량이 높은 활엽수림(US-MMS)의 연간 NEE 값이 관측기간 동안 다른 활엽수림(US-UMB)에 비해 항상 낮아 두 가지 기상인자가 탄소 흡수와 관련이 있음을 확인할 수 있다. 프랑스의 폰탄블루

Table 2. Annual net ecosystem exchange (NEE) for the forest study sites. The unit of NEE is $\text{gC/m}^2/\text{yr}$. For detailed information on each site, please refer to table 1

Year	Site									
	KR-GDK	KR-GCK	KR-SMK	JP-TKY	JP-FJY	JP-MBF	US-UMB	US-MMS	FR-Fon	FR-Hes
2000				-477	-195		-211	-367		-623
2001				-301	-227		-164	-381		-607
2002				-386	-228		-188	-475		-616
2003				-266	-154		-232	-433		-464
2004				-225	-221	-488	-208	-534		-363
2005				-404	-282	-432	-323	-515	-578	-277
2006	-31			-445	-315		-312	-476	-600	-382
2007		-222		-308	-276		-320	-517	-710	
2008	-274	-193	-362		-259		-260	-444	-693	
2009							-272	-330	-658	
2010							-224	-473	-731	
Mean	-153	-208	-362	-352	-240	-460	-247	-450	-662	-476

활엽수림(FR-Fon)은 17세기부터 현재까지 산림으로 보전되면서 어린 나무부터 노거수까지 여러 세대가 균락을 이뤄 자라고 있다(Pontailier et al, 1997). 이 활엽수림의 연간 NEE 값은 $-578 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 에서 $-731 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 로 매우 높은 탄소 흡수 능력을 가지고 있었다. 프랑스 헤세의 활엽수림(FR-Hes)의 경우 $-277 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 에서 $-623 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 의 연간 NEE 값이 관측되었고, 조사 기간 동안 관측된 NEE는 해가 갈수록 점차 높아지는 경향을 보였다.

1973년 우리나라 기상관측 이래로 2006년은 전국적 장마기간 동안 가장 많은 비가 왔던 해이다. 불확실성이 큰 2006년 광릉 자료를 제외한 우리나라, 일본, 미국 활엽수림의 연평균 NEE 값은 각각 $-274 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (KR-GDK), $-352 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (JP-TKY), $-348 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (US-MMS, US-UMB)으로 일본과 미국에 비해 우리나라 활엽수림은 상대적으로 탄소 흡수 정도가 낮았지만, 우리나라 산림의 경우 처리된 자료의 기간이 짧아 장기적 관점의 비교는 어렵다. 프랑스의 폰탄블루 활엽수림의 경우 미국의 활엽수림보다 탄소 흡수 정도가 거의 2배 가까이 높은데, 이는 매우 오래된 산림의 경우 나무 외에도 탄소 저장의 중요 역할을 하는 토양, 낙엽층 등에 저장되는 탄소량이 높기 때문으로 알려져 있다(Luyssaert et al, 2008). 프랑스 헤세 활엽수림도 우리나라와 일본보다 낮은 연평균 NEE($-476 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$)를 가지는데, 이곳은 유럽의 흔한 수종인 유럽너도밤나무(*Fagus*

sylvatica) 숲으로 유럽의 산림 특성을 파악하기 위해 참고 할 수 있다. 침엽수림의 경우 우리나라의 연평균 NEE 값은 $-208 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (KR-GCK), 일본은 $-240 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (JP-FJY)이다.

2. 농경지 생태계의 NEE

Table 3은 농경지에서의 NEE 값을 나타낸다. 강원도 양구군 해안면에서 측정된 감자 밭의 NEE 값은 $-210 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ (KR-HAP)이나, 모자이크 형태인 밭의 크기가 작고 주변의 도로 영향과 함께 밭두렁의 다른 작물의 영향을 받았을 것으로 보인다. 감자 밭보다는 비교적 면적이 넓고 균일한 형태인 양구군 해안면의 논 또한 주변 다른 작물이나 농경지가 아닌 다른 토지형태의 간접적인 영향을 받았을 가능성을 배제 할 수 없지만, 양구군 해안면의 논 NEE는 $-248 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ (KR-HAR)로 비가 논에서 성장하는 시기에 논이 이산화탄소를 흡수하는 탄소 흡수원임을 보여준다(Figure 2). 이는 매해의 기상 조건과 기상 이변에 따라 차이는 발생하나, 이앙 전이나 추수 후를 제외하고 벼의 성장 기간 동안 논이 탄소 흡수 능력이 있음을 뒷받침한다(Moon et al, 2003; Lee et al, 2005).

일본의 논은 한국의 논과 기후 조건이나 품종이 비슷하여 정량적 비교가 가능하다. 일본의 논(JP-Mas)에서는 $-356 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 에서 $-487 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 의 범위를 보인다

Table 3. Net ecosystem exchange (NEE) for the cropland study sites (R=rice, B=beet, W=winter wheat, P=potato, S=soybean, M=maize). The unit of NEE is $\text{gC/m}^2/\text{growing season}$. For detailed information on each site, please refer to table 1

Year	Site					
	KR-HAR	KR-HAP	KR-HFK	JP-Mas	BE-Lon	US-Ne3
2002				-369 (R)		43 (S)
2003				-359 (R)		-354 (M)
2004				-487 (R)	-504(B)	36 (S)
2005				-356 (R)	-514(W)	-494 (M)
2006					-101(P)	-16 (S)
2007					-494(W)	-428 (M)
2008			-229 (R)		-808(B)	-38 (S)
2009						-650 (M)
2010	-248 (R)	-210 (P)				-79 (S)

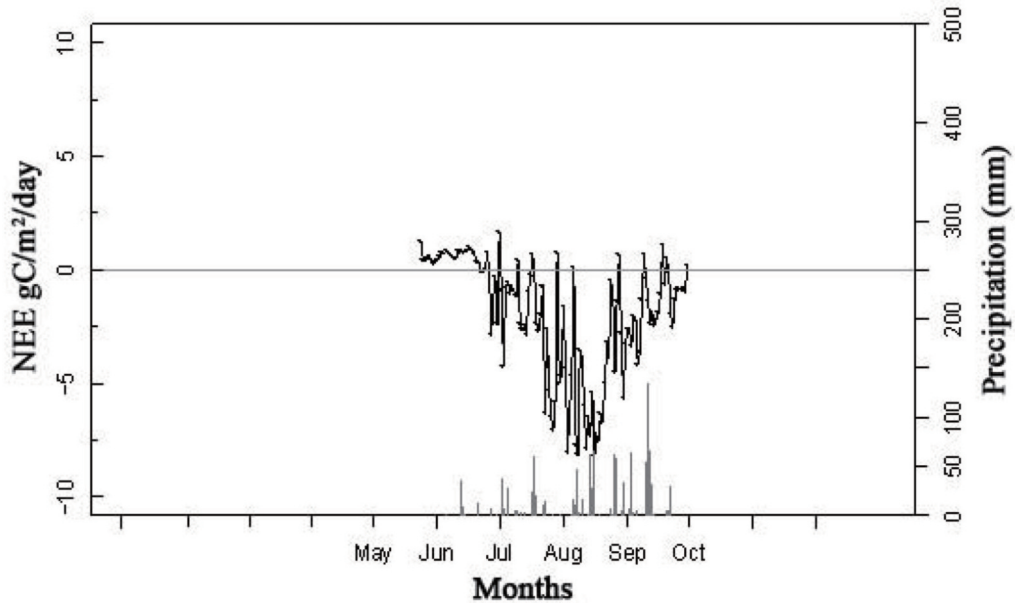


Figure 2. Daily variation of NEE and precipitation at the rice paddy site (KR-HAR, 2010) in Haeon, South Korea. Note that NEE of the rice paddy site was estimated during the period of rice growth (from the transplanting to the harvest).

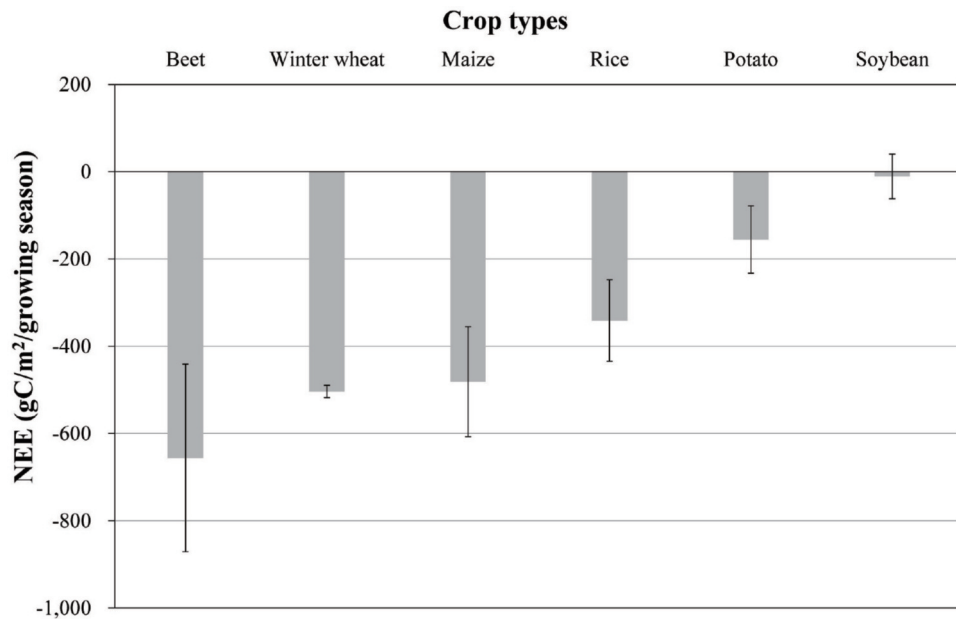


Figure 3. The growing-season average values (\pm SD) of NEE for the six crop types, including beet (Day of Year (DOY) ca. 90 to 273), winter wheat (DOY ca. 268 to 249 (+1 year)), maize (DOY ca. 116 to 290), rice (DOY ca. 140 to 290), potato (DOY ca. 116 to 273), and soybean (DOY ca. 140 to 285).

(Table 3). 일본 마세에서 측정된 자료는 비교적 면적이 넓고 균일하여 다른 작물이나 논 이외의 토지 유형 영향이 미미하다고 볼 수 있다. Ceschia et al. (2010)에 따르면, 스페인의 논에서는 NEE가 약 $-300 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 에서 $-700 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 으로 여름철의 논은 이산화탄소 흡

수 기능이 높음을 알 수 있다.

우리나라 주요 작물인 벼와 감자, 세계 주요 작물인 콩, 비트, 옥수수, 겨울밀 등의 NEE 값을 비교해보면 비트가 가장 낮은 NEE 값($-656 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$)을 보이며, 그 다음은 겨울밀($-504 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$)과 옥수수($-482 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$)가 비슷한 정도의 NEE를 보이고, 벼는 중간 정도($-341 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$), 감자는 $-156 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$, 콩의 NEE는 $-10.8 \text{ gC/m}^2/\text{growing season}$ 로 0에 가까웠다 (Figure 3). 옥수수의 NEE는 다른 작물들의 NEE보다 상대적으로 낮았는데, 이는 옥수수가 C4 식물 중 하나로서 다른 작물들에 비해 광합성 효율이 높기 때문으로 판단된다. 광합성 효율은 생태계 탄소량에 정비례한 영향을 주며(Lee 2015), C3 식물이라도 벼와 같이 잎 면적 지수가 큰 작물은 성장기간 동안 비교적 높은 광합성 효율을 보인다.

IV. 결론

본 연구에서는 에디 공분산 관측 기반의 NEE 분석을 통해 산림과 농경지 생태계의 탄소 흡수량을 정량적으로 추정할 수 있었다. 활엽수림은 늦봄과 초여름, 초가을에, 침엽수림은 봄과 초여름, 가을중순에 높은 탄소 흡수 수준을 보여 탄소 흡수 능력이 임상과 특정 시기에 따라 서로 다름을 확인할 수 있었다. 또한 임령이 높은 활엽수림이나 침엽수림 같은 단순림보다 임령이 어린 혼효림의 탄소 흡수 능력이 더 컸다. 농민과 농작물에 따라 경작 시기, 제초, 살충 등의 관리 방법, 수확 시기 등이 달라 농경지에서의 탄소 수지 측정이 복잡하고 해석이 어렵지만(Wattenbach et al. 2010), 에디 공분산 방법으로 측정된 NEE를 통해 농경지 생태계도 농작물의 성장기간에는 탄소 흡수원으로 작용함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 탄소 흡수원 조성 시 수종 다양성을 높인다가나, 겨울밀의 높은 탄소 흡수량에서 알 수 있듯이 겨울철에도 경작지를 활용하는 방안을 모색하는 등의 향후 산림 및 농경지에서의 탄소저감 정책에 활용될 수 있다.

에디 공분산 플럭스 타워는 대기와 생태계 사이의 에너지와 이산화탄소의 흐름을 측정하는 시스템으로 현재 전 세계 연구자들의 높은 신뢰를 받고 있는 방법 중 하나이다(Thomas et al. 2008). AsiaFlux와 AmeriFlux, CarboEurope 등 각 지역별 네트워크가 하나의 네트워크인 Fluxnet을 이뤄, 다양한 식생 및 토지이용에서 에디 공분산 플럭스 타워의 활용이 가능하고, 이미 많은 생태계에서 모니터링이 이루어지고 있다. 플럭스 타워에서 나오는 자료는 생지화학 모델링이나 인공위성영상 알고리즘 개선 및 평가에도 활용되어 규모와 생태계 유형별로 보다 더 정확한 탄소 수지의 정량화를 가능하게 할 수 있다.

우리나라의 논과 밭은 비교적 그 규모가 작은 모자이크 경관으로 논과 밭 주변의 다른 작물과 인접한 토지이용 형태, 지형 등의 영향을 많이 받을 수 있다. 이러한 곳에서는 플럭스 발자국(footprint)과 식생 및 지형 지수들의 면밀한 분석을 통해 좀 더 정밀한 탄소 수지 추정이 필요하다. 아직까지 국내에서는 플럭스 타워의 분포가 다양하지 않고 자료수집 기간이 짧은 편이지만, 신기후체제 합의문인 파리 협정에 맞추어 생태계 유형별 온실가스 흡수 기능을 정확히 평가하는 데 있어 플럭스 타워의 적극적인 활용을 고려해 보아야 한다. 에디 공분산 관측자료를 통한 생태계 탄소 흐름 측정 및 분석, 정확도 향상, 활용 고도화를 위한 사업이 활발히 진행되어 온실가스 감축 관련 연구자 및 정책 결정자들에게 탄소 수지에 대한 신뢰도 높은 정보제공이 필요하다. 향후 플럭스 타워와 연계된 장기 모니터링 체계 구축과 인공위성영상이나 탄소 수지 예측 모형과의 결합 및 발전은 지역적, 국가적, 나아가 전 지구적 기후 변화 대응에 있어 중요한 기반이 될 것이다.

사사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원(KEI)의 일반사업으로 수행된 「환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구(GP2016-14)」의 일부 내용을 바탕으로 작성되었습니다.

References

- Ahn SR, Park GA, Jang CH, Kim SJ. 2013. Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model. *Journal of Korea Water Resources Association*. 46(6): 569-583. [Korean Literature]
- Baldocchi D, Valentini R, Running S, Oechel W, Dahlen R. 1996. Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*. 2(3): 159-168.
- Ceschia E, Béziat P, Dejoux JF, Aubinet M, Bernhofer C, Bodson B, Buchmann N, Carrara A, Cellier P, Di Tommasi P, Elbers J, Eugster W, Grunwald T, Jacobs C, Jans W, Jones M, Kutsch W, Lanigan G, Magliulo E, Marloie O, Moors E, Moureaux C, Olioso A, Osborne B, Sanz M-J, Saunders M, Smith P, Soegaard H, Wattenbach M. 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 139(3): 363-383.
- Ciais P, Wattenbach M, Vuichard, N, Smith P, Piao SL, Don A, Luysaert S, Janssens IA, Bondeau A, Dechow R, Leip A, Smith PC, Beer C, van der Werf GR, Gervois S, van Oost K, Tomelleri E, Freibauer A, Schulze ED, CarboEurope Synthesis Team. 2009. The European carbon balance: Part 2: croplands. *Global Change Biology*. 16: 1409-1428.
- Ito A, Oikawa T. 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*. 151(2-3): 143-176.
- Kirschbaum MUF, Eamus D, Gifford RM, Roxburgh SH, Sands PJ. 2001. Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. NEE (Net Ecosystem Exchange) Workshop proceedings. 2001 Apr 18-20. Cooperative research centre for greenhouse accounting. Canberra, Australia. p. 2-5.
- Kwon HJ, Lee JH, Lee YK, Lee JW. 2009. Seasonal variations of evapotranspiration observed in a mixed forest in the Seolmacheon catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 11: 39-47. [Korean Literature]
- Law BE, Turner D, Campbell J, Sun OJ, Van Tuyl S, Ritts WD, Cohen WB. 2004. Disturbance and climate effects on carbon stocks and fluxes across Western Oregon USA. *Global Change Biology*. 10(9): 1429-1444.
- Lee BR. 2015. Remote sensing-based assessment of gross primary production in agricultural ecosystems. Ph.D. Dissertation, University of Bayreuth.
- Lee BR, Kang SK, Kim ES, Hwang TH. 2007. Evaluation of a hydro-ecologic model, RHESys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System): parameterization and application at two complex terrain watersheds. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 9: 247-259. [Korean Literature]
- Lee JT, Lee YS, Kim GY, and Shim KM. 2005. CO₂ and water vapor flux measurement by eddy covariance method in a paddy field in Korea. *Korea Journal of*

- Agricultural and Forest Meteorology. 7(1): 45-50.
- Li Y-L, Tenhunen J, Owen K, Schmitt M, Bahn M, Droesler, Otieno D, Schmidt M, Gruenwald Th, Hussain MZ, Mirzae H, Bernhofer C. 2008. Patterns in CO₂ gas exchange capacity of grassland ecosystems in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(1): 51-68.
- Luyssaert S, Schulze ED, Borner A, Knohl A, Hessenmoller D, Law BE, Ciais P, Grace J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*. 455(7210): 213-215.
- Moon BK, Hong JK, Lee BR, Yun JI, Park EW, and Kim J. 2003. CO₂ and energy exchange in a rice paddy for the growing season of 2002 in Hari, Korea. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology*. 5(2): 51-60.
- Ogutu BO, Dash J, Dawson TP. 2013. Developing a diagnostic model for estimating terrestrial vegetation gross primary productivity using the photosynthetic quantum yield and earth observation data. *Global Change Biology*. 19(9): 2878-2892.
- Ottander C, Oquist G. 1991. Recovery of photosynthesis in winter-stressed Scots pine. *Plant, Cell and Environment*. 14: 345-349.
- Owen KE, Tenhunen J, Reichstein M, Wang Q, Falge E, Geyer R, Xiao X, Stoy P, Ammann C, Arain A, Aubinet, M, Aurela, M, Bernhofer C, Chojnicki BH, Granier A, Gruenwald T, Hadley J, Heinesch B, Hollinger D, Knohl A, Kutsch W, Lohila A, Meyers T, Moors E, Moureaux C, Pilegaard K, Saigusa N, Verma S, Vesala T, Vogel C. 2007. Linking flux network measurements to continental scale simulations: ecosystem carbon dioxide exchange capacity under non-water-stressed conditions. *Global Change Biology*. 13(4): 734-760.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M. 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*. 3: 571-583.
- Pontailleur JY, Faille A, Lemee G. 1997. Storms drive successional dynamics in natural forests: a case study in Fontainebleau forest (France). *Forest Ecology and Management*. 98(1): 1-15.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grunwald T, Havrankova K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival J-M, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*. 11(9): 1424-1439.
- Reichstein M, Moffat AM. 2014. REdDyProc: data processing and plotting utilities of (half-) hourly eddy-covariance measurements. R package version 0.8-2.
- Richardson AD, Black TA, Ciais P, Delbart N, Friedl MA, Gobron N, Hollinger DY, Kutsch WL, Longdoz B, Luyssaert S, Migliavacca M, Montagnani L, Munger JW, Moors E, Piao S, Rebmann C,

- Reichstein M, Saigusa N, Tomelleri E, Vargas R, Varlagin A. 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*. 365(1555): 3227-3246.
- Running SW, Nemani RR, Heinsch FA, Zhao M, Reeves M, Hashimoto H. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*. 54(6): 547-560.
- Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, Kondo H. 2005. Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 134(1-4): 4-16.
- Shin HJ, Park MJ, Kim SJ. 2012. Evaluation of forest watershed hydro-ecology using measured data and RHESSys model -For the Seolmacheon Catchment-. *Journal of Korea Water Resources Association*. 45(12): 1293-1307. [Korean Literature]
- Son Y, Park IH, Yi MJ, Jin HO, Kim DY, Kim RH, Hwang JO. 2004. Biomass production and nutrient distribution of a natural oak forest in central Korea. *Ecological Research*. 19(1): 21-28.
- Thomas C, Martin JG, Goeckede M, Siqueira MB, Foken T, Law BE, Loescher HW, Katul G. 2008. Estimating daytime subcanopy respiration from conditional sampling methods applied to multi-scalar high frequency turbulence time series. *Agricultural and Forest Meteorology*. 148(8-9): 1210-1229.
- Wang YP, Polglase PJ. 1995. Carbon balance in the tundra, boreal forest and humid tropical forest during Climate change: scaling up from leaf physiology and soil carbon dynamics. *Plant, Cell and Environment*. 18(10): 1-20.
- Wattenbach M, Sus O, Vuichard N, Lehuger S, Gottschalk P, Li L, Leip A, Williams M, Tomelleri E, Kutsch WL, Buchmann N, Eugster W, Dietiker D, Aubinet M, Ceschia E, Beziat P, Guenwald T, Hastings A, Osborne B, Ciais P, Cellier P, Smith P. 2010. The carbon balance of European croplands: a cross-site comparison of simulation models. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 139(3): 419-453.
- White MA, Thornton PE, Running SW, Nemani RR. 2000. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. *Earth Interactions*. 4(3): 1-85.
- Wu C, Niu Z, Tang Q, Huang W, Rivard B, Feng J. 2009. Remote estimation of gross primary production in wheat using chlorophyll-related vegetation indices. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149(6-7): 1015-1021.
- You S, Lee W-K, Son Y, Ito A. 2012. Estimation of vegetation carbon budget in South Korea using ecosystem model and spatio-temporal environmental information. *Korean Journal of Remote Sensing*. 28(1): 145-157. [Korean Literature]
- Zhao P, Lüers J. 2012. Improved determination of daytime net ecosystem exchange of carbon dioxide at croplands. *Biogeosciences Discussions*. 9(3): 2883-2919.