



플럭스 타워 설치 유역을 대상으로 탄소수지 분석을 위한 위성영상자료기반의 CO₂ 정량화 연구

Quantitative Study of CO₂ based on Satellite Image for Carbon Budget on Flux Tower Watersheds

정충길* · 이용관* · 김성준** · 장철희***,†

Jung, Chung Gil · Lee, Yong Gwan · Kim, Seong Joon · Jang, Cheol Hee

Abstract

Spatial heterogeneous characteristics of solar radiation energy from Climate Change gives rise to energy imbalance in the general ecological system including water resources. This study is to estimate the CO₂ flux of South Korea using Terra MODIS image and to assess the reliability of MODIS data from the ground measured CO₂ flux by eddy covariance flux tower data at 3 locations (two at mixed forest area and one at rice paddy area). The MODIS Gross Primary Productivity (GPP) product (MOD17A2), 8-day composite at 1-km spatial resolution was adopted for the spatial CO₂ flux generation. The MOD17A2 data by noise like cloud and snow in a day were tried to fill by Inverse Distance Weighted (IDW) method from valid pixels and the damping effect of MOD17A2 data were corrected by Quality Control (QC) flag. The MODIS CO₂ flux was estimated as the sum of GPP and Re (ecosystem respiration) by Lloyd and Taylor method (1994). The determination coefficient (R²) between MODIS CO₂ and flux tower CO₂ for 3 years (2011~2013) showed 0.55 and 0.60 in 2 mixed forests and 0.56 in rice paddy respectively. The CO₂ flux generally fluctuated showing minus values during summer rainy season (from July to August) and maintaining plus values for other periods. The MODIS CO₂ flux can be a useful information for extensive area, for example, as a reliable indicator on ecological circulation system.

Keywords: MODIS GPP; Eddy covariance; CO₂; Lloyd and Taylor

1. 서론

기후변화와 산업화로 인한 도시 인구의 증가, 무분별한 개발 등으로 인하여 대기 중의 CO₂가 증가함에 따라 태양복사 에너지의 분포에 대한 공간적인 불균형이 발생한다. 이에 따른 지표-대기시스템의 에너지 이동의 변화는 기후, 기상현상 및 물의 순환까지 영향을 미친다. 이와 같이 기후변화로 인한 에너지 분야의 문제가 대두됨에 따라 물리적인 해석을 통해 에너지의 흐름을 이해하기 위한 노력이 요구되어 왔다 (Kim et al., 2013). 이 중에서 CO₂의 증가로 인한 지구 온난화 문제는 지속가능한 경제발전과 삶의 질을 위협하는 원인으로 인

식되고 있다. 특히 지구 온난화 문제에 대한 국가 차원의 정책을 지원하고 일반인들의 의식 수준을 높이기 위해서는 탄소 순환이 일어나는 메커니즘에 대한 이해가 필수적이다. 지구 기후변화의 주 원인물질로 주목 받고 있는 대기 중 CO₂ 농도의 동태에 관한 관심이 고조됨에 따라, 생태계 내의 다양한 탄소순환과정의 변화를 감지하고 정량화하려는 노력들이 세계적으로 널리 시도되고 있다 (Sellers et al., 1994; Running et al., 2000).

생태계에서 CO₂는 순일차생산성 (Net Primary Productivity, NPP)과 총일차생산성 (Gross Primary Productivity, GPP)에 의해 영향을 받으며 CO₂의 흡수와 발원으로 NPP와 GPP는 결정된다. 이러한 이유로 탄소 생태계순환의 흐름을 파악하기 위해서는 CO₂수치를 정량화 할 수 있는 GPP 산정이 중요시 된다. 생태계 탄소순환과정을 정량화하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있으며 기후변화 문제를 과학적으로 연구하는데 있어서 가장 기본적이며 중요한 것이 실측을 통한 지속적인 생태계의 감시라고 할 수 있다. 이 중, 인공위성을 이용한 연구는 지난 20여 년간의 짧은 연구기간에도 불구하고, 지구관측시스템의 급속한 발전을 거듭하였다. 지구관측시스템의 핵심인 미 항공우주국의 Terra와 Aqua 인공위성을 이용한 MODIS (Moderate Resolution Image Spectrometer) 위성은

* Konkuk university, department of civil and environmental system engineering

** Konkuk university, department of civil and environmental system engineering, Professor

*** Korea institute of civil engineering and building technology, department of water resources and environment research, senior researcher

† Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0745 Fax: +82-2-444-0186

E-mail: chjang@kict.re.kr

Received: January 30, 2015

Revised: May 8, 2015

Accepted: May 21, 2015

총 36개의 분광밴드 자료를 지역에 따라 1-2일의 간격으로 1000 m, 500 m, 250 m의 공간해상도로 촬영한다 (Running et al., 2000). 이러한 영상자료는 8일 간격의 GPP와 NPP 영상을 제공하여 많은 연구에 이용되고 있으나 MODIS GPP의 생산 알고리즘은 여러 가지 측면에서 오차요인을 포함하고 있다. 이러한 오차요인을 규명하고 입력 자료를 개선하는 한편 궁극적으로 알고리즘을 개선함으로써 보다 신뢰성 높은 자료 공급을 위한 다양한 노력들이 진행되고 있다 (Cohen and Justice, 1999; Morisette et al., 2002; Myneni et al., 2002; Kang et al., 2003; Turner et al., 2003; Zhao et al., 2005).

에디 공분산 방법은 지면과 대기 사이에 교환되는 에너지 및 다양한 물질(수증기, 이산화탄소, 메탄, 에어로솔 등)을 정량화하는 가장 대표적인 미기상학 방법으로서 적용 조건을 만족하는 환경에서 에디 공분산 방법을 사용할 경우, 대상 생태계를 손상시키지 않고 에너지, 물 및 탄소 순환에 관한 중요한 정보들을 직접 관측하여 얻을 수 있어 효과적으로 다양한 분야의 연구자들과의 협력을 가능하게 하고 최종 사용자들이 올바른 정보 해석을 할 수 있도록 도울 수 있다. 에너지의 정량적인 파악을 목적으로 전구 플렉스 관측망 (FLUXNET)이 구축되었으며, 식생을 포함한 지표-대기에서의 에너지와 물질(탄소, 메탄, 에어로솔, 수증기)의 교환을 측정하는 에디 공분산 (eddy covariance) 기술을 기반으로 관측을 실시하였다 (Choi et al., 1999; Kwon et al., 2007; Kang et al., 2009; Hong et al., 2009; Kwon and Kim, 2010). FLUXNET에 일본, 중국 등 아시아 국가를 중심으로 한 AsiaFlux가 속하여 있으며 국내에서는 같은 비전을 공유하는 KoFlux가 중요한 역할을 담당하고 있다. KoFlux는 미기상적인 현상에 대해서 정확하게 정량적으로 측정 가능하여 국내 수문기상 관측에서의 측을 담당하고 있다. 이러한 플렉스 데이터를 사용한 연구는 다양한 목적으로 이루어지고 있다.

MODIS 위성영상을 이용한 탄소 관련 연구는 Zhao and Running (2010)은 2000~2009년 동안 MODIS의 식생 지수인 NPP의 탄소 흡수능 감소를 분석하여 전 지구 가뭄지수 (PSDI: Palmer Drought Severity Index)를 산출하였으며 Guo et al. (2012)은 MODIS GPP와 MODIS LST 위성영상자료와 GOSAT TANSO (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation aboard the Greenhouse gases Observing SATellite) 탄소측정 위성자료의 선형회귀모형을 이용하여 전 지구적 탄소량을 정량화 하였다. 탄소 정량화 연구는 국외연구에 국한되어있고 전 지구적 수준의 정량화연구가 진행되어 왔다. 이는, 국내의 실정과 수준의 맞지 않아 그대로 반영되기 어려우며 지역 수준의 세밀한 국내 탄소정량

화 연구가 요구된다.

본 연구에서는 생태계에서의 탄소수지 정량화를 위한 지표로서 CO₂ 규모의 파악을 위하여, 현재 CO₂ Flux 자료가 측정되고 있는 용담댐, 설마천 및 청미천 유역을 대상으로 CO₂를 구하고자 하였다. 위성영상을 이용하여 직접적인 CO₂의 양을 나타내는 자료의 부재로 MODIS GPP로부터 CO₂의 양을 추정하는 방법을 정립하고 산정결과와 실측값의 적용성을 평가하고자 한다. 따라서, 여러 측면에서 널리 활용되고 신뢰성 있는 자료로 판단되는 MODIS 위성영상에 대해 지구온난화에 따른 생태계 탄소흐름에 대한 관심이 고조됨에 따라 CO₂수치를 정량화하여 탄소수지 분석하여 추후 전국적인 탄소수지 정량화 연구를 위한 기반연구로 활용하고자 한다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 MODIS GPP 자료로부터 CO₂를 산정하여 CO₂ Flux자료와 비교 검토하여 신뢰성 및 적용성을 평가하기 위하여 Terra MODIS 위성영상을 통해 제작된 GPP Product를 수집하여 용담댐, 설마천 및 청미천 유역의 CO₂를 추출한 후, 실측자료를 이용하여 산정한 CO₂와 비교하였다 (Fig. 1). 실측자료로 Flux 자료를 이용하였으며 Flux 자료로부터 산정한 CO₂를 Flux CO₂라 정의 하였다.

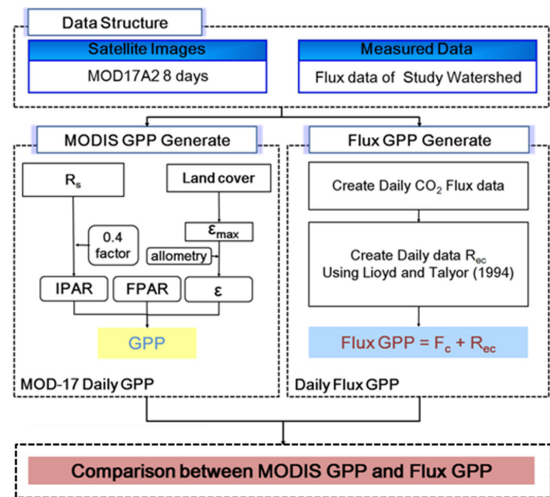


Fig. 1 The flow chart of study procedure

1. 연구대상지역

본 연구에서는 경기도 파주시 적성면에 위치한 설마천 유역과 이천시 장호원읍에 위치한 청미천 유역, 금강 상류의 용

담댐 유역을 대상 유역으로 선정하였다(Fig. 2). 설마천 유역은 북위 37° 55' ~ 37° 58', 동경 126° 52' ~ 126° 58' 사이에 위치하며 유역 면적은 대략 8.54 km²으로 임진강 전체 유역 면적의 약 0.2 %를 차지하고 있다. 유로연장은 5.8 km, 유로경사 2 %, 해발고도 420 m의 전형적인 산지 하천으로, 유역의 연평균 강우량은 1,210 mm이다. 이 유역의 90 % 이상이 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있고 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮으며, 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우 시 토석류를 유발한다 (Joh et al., 2010). 청미천은 북위 37° 02' 09", 동경 127° 39' 26"에 위치하고 있으며, 여주군에서 남한강으로 유입하는 지방 2급 하천으로 유역면적 596.6 km², 유역 평균경사 17.01 %, 약 83 %의 면적이 산지이며, 해발고도는 310 m인 산지하천이다. 청미천 유역은 KoFlux 연구지역인 해남 지점과 같은 논경작지로 구성이 되어 있으며 토성은 사양도가 주를 이루며 (Hur and Choi, 2011), 연 평균 온도는 11.5 °C, 연 평균 강우량은 1,107 mm이다 (Sur et al., 2012).

용담댐 유역은 북위 35° 35' ~ 36° 00', 동경 127° 20' ~ 127° 45'의 범위에 위치하고 있으며, 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐 있다. 유역면적은 930 km²로 금강 유역면적의 약 9.5 %를 차지하고 있으며, 대부분이 산지와 농업지역으로 각각 70 %, 21 %를 차지하고 있다. 유역의 연평균 기온은 11.6 °C이며, 연평균 강수량은 1,362.3 mm이다 (Park et al., 2014). 덕유산 플럭스 타워는 금강 수계 구량천의 상류부의 덕곡제 유역 내 북위 35°

51' 53", 동경 127° 43' 02"에 위치한다. 덕유산 플럭스 타워의 표고는 688.6 m이고, 유역 내 토지이용은 대부분이 산림으로 침활 혼효림과 낙엽송림 분포하고 있다 (K-water, 2013).

2. CO₂ Flux 이론

가. 에디 공분산 (Eddy Covariance) 방법

에디 공분산 방법은 생태계에서 난류 흐름의 원리로부터 얻어진다. 난류흐름은 공기가 회전하는 소용돌이의 수평흐름으로 볼 수 있다. 이러한 Eddy의 흐름은 무질서해 보이지만 타워 관측을 통해 그 수평 및 연직 성분을 측정할 수 있다. 예를 들어, 3개의 CO₂ 분자가 올라가고 그 순간 2개의 CO₂ 분자가 내려왔다면 이 때의 순 Flux는 1개의 CO₂ 분자가 상향이동하는 Flux가 된다. 이것이 바로 에디 공분산 관측의 일반적인 원리이다. 실제 Flux는 연직 풍속과 혼합비의 편차의 공분산과 공기 밀도와와 곱을 평균한 값과 거의 일치한다. 본 연구에서 사용되는 CO₂ Flux 자료는 연직 풍속과 CO₂ 혼합비의 편차의 공분산을 평균한 값이 된다 (Hong et al., 2009).

본 연구에서는 KoFlux의 관측지중의 하나인 경기도 설마천의 20 m 타워에서 3차원 초음파 풍향·풍속계와 적외선 기체 분석기를 사용하여 Eddy Covariance 방법으로 관측된 CO₂ Flux 자료를 이용하였다. 여기서, KoFlux는 전구관측망인 FLUXNET에 등재되어, 일본, 중국과 더불어 AsiaFlux 네트워크의 발전과 확장 운영에 크게 기여하는 한반도 내의 육상 생태계의 탄소 및 물 순환을 감시하여 지속적으로 탄소 및 물 순환 관련 자료를 생산하여 효율적인 데이터베이스를 구축하는 관측망 시스템이다.

나. MODIS GPP

Terra MODIS GPP product (MOD17A2)는 미항공우주국의 지구관측시스템인 Terra 인공위성에 탑재된 MODIS 센서에서 측정된 GPP의 양을 나타낸 것으로, 미항공우주국은 1 km 공간해상도와 8일 단위 시간해상도의 MODIS GPP를 제공한다 (Table 1). 미항공우주국에서 제공하는 MODIS GPP 산출물은 8일간 누적 총일차생산성 (GPP), 8일간 누적 순광합성 (Net Photosynthesis, PSNnet), GPP와 PSN 자료의 QC (Quality Control) 자료로 구성되어 있다 (Table 2). Table 2에서 Fill은 구름이나 눈 등으로 인한 결측 부분을 각 결측 원인에 따른 Fill Value로 채워 넣은 값을 의미한다. Fill 값에 대한

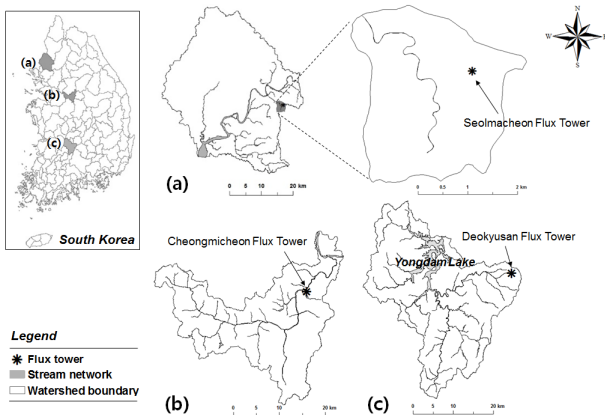


Fig. 2 Study areas: (a) Seolmacheon (b) Cheongmicheon (c) Yongdam Dam

Table 1 Terra MODIS GPP Product (MOD17A2)

Short Name	Platform	MODIS Data Product	Raster Type	Resolution (m)	Temporal Granularity
MOD17A2	Terra	Gross Primary Productivity	Tile	1000	8 day

Table 2 Science Data Sets for MODIS/Terra GPP 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V005 (MOD17A2)

Science Data Sets (HDF Layers)	Units	Bit Type	Fill	Valid Range	Multiply By Scale Factor
GPP_1km: Gross Primary Production	kg_C/m ²	16-bit signed integer	32761 ~ 32767	0 ~ 30000	0.0001
PsnNet_1km: Net Photosynthesis (GPP- maintenance respiration)	kg_C/m ²	16-bit signed integer	32761 ~ 32767	-30000~ 30000	0.0001
PSN_QC_1km: QC for GPP/PSN	Bit	8-bit unsigned integer	255	0 ~ 254	N/A

Source: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod17a2

설명은 LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)의 Data Product Table에서 설명하고 있다. Fill 값을 제외한 유효값은 Valid Range에 나타나 있으며, 이 값에 각 Later 별 Scale Factor를 곱하면 원하는 Product를 얻을 수 있다.

각각의 알고리즘에 대한 자세한 소개는 MODIS GPP 알고리즘 개발을 담당한 미국 몬타나대학의 Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG) 연구실에서 제공하는 MOD17 GPP/NPP User's Guide에 나와 있다 (Heinsch et al., 2003). MODIS GPP는 식물의 복사사용효율에 기초를 두고 알고리즘은 식물의 빛에너지 전환효율에 입각한 방정식을 사용하여 광합성가용광에너지 (Photosynthetically Active Radiation, PAR), 식물이 흡수한 PAR의 곱으로 이루어 진다 (Kang et al., 2005).

$$GPP = [\varepsilon] \times [FPAR \cdot IPAR] \quad (1)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{max} \cdot f(T_{min}) \cdot f(VPD)] \quad (2)$$

$$IPAR = [0.45 \times R_s] \quad (3)$$

여기서 ε 은 식물의 복사사용효율(radiation use efficiency)이며, ε_{max} 는 최대복사사용효율, T_{min} 은 일최저기온, VPD 는 포차, R_s 는 전천단파일사량이며, $FPAR$ 는 식물이 흡수한 PAR의 비율로서 0에서 1의 값을 갖는다. 즉, 식물이 흡수한 광합성유효복사가 많을수록, 식물의 복사사용효율이 높을수록, 총일차생산성은 증가한다. 각각의 매개변수값의 근거 제시는 MOD17 GPP/NPP User's Guide를 참조한다.

본 연구에서는 2008년 기간 동안의 8일 주기 MODIS GPP 영상을 LP DAAC에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool (MRT)을 이용하여 WGS84/UTM으로 좌표변환을 통해 한반도 지역의 GPP 맵을 추출하였다. 만약 GPP 영상에 구름 혹은 눈 등이 존재하는 것으로 판별된 경우, MODIS GPP는 신뢰성이 없는 값을 보이게 되는데 이들 영상의 추정치에 사용되

는 MODIS 가시광선-적외선 구간의 지표면 반사도가 식생 표면의 반사도가 아닌 구름 상층부의 반사도를 의미하기 때문이다 (Kang, 2005). 따라서 MODIS 영상에서 구름에 오염된 pixel의 영상자료를 사용해서는 안되며 1차적으로 윤량에 대한 보정이 필요하다. MODIS 영상의 각 픽셀에 대해 자료의 질을 평가한 부가적인 정보는 QC 영상을 통해 주어지는데, 이는 0에서 255까지의 8비트 (bit) 정수로 표현된다. 각각의 비트 값은 센서의 오작동 여부, 구름의 존재 여부, 계산에 사용된 알고리즘의 종류 등에 대한 정보를 담고 있다 (Myneni et al. 2002). FPAR, LAI, GPP의 QC에서 [0, 1, 32, 33, 64, 65, 96, 97] 이외의 값은 어떠한 형태로든 구름에 의해 픽셀이 오염되었음을 알려준다. 본 연구에서는 QC 영상을 GPP 영상과 동일하게 동일한 과정을 통해 변환하고, QC 영상에서 구름에 의해 오염된 픽셀을 나타내는 값을 GPP 맵에서 제외하여 1차적인 윤량 보정을 실시하였다. 윤량 보정 후 걸러진 GPP 맵의 유효한 값을 추출하고 한반도 전체로 내삽 (Interpolation)하는 Gap Filling 작업을 실시하여 구름에 의한 영향을 감소한 GPP 맵을 산정하였다.

3. CO₂ Flux 산정 방법

가. GPP와 CO₂ 관계

CO₂ 순환은 크게 3분류로 나눌 수 있다. 식물이 광합성 작용을 하여 대기 중의 CO₂를 흡수하고 산소를 생산하는 과정과 식물이 자신의 생체량을 유지하거나, 자가호흡형태로 CO₂를 흡수하는 과정 그리고 식물의 낙엽과 죽은 가지 등이 미생물에 의하여 썩으면서 CO₂를 발생하는 과정, 즉 중속영양호흡 과정을 말한다. 이와 같이, 산림에서의 CO₂순환에 의한 CO₂ 고정량을 GPP라고 할 수 있다.

식물은 광합성을 통해 대기 중의 CO₂를 흡수하는 동시에 지상부와 지하부의 호흡을 통해 그 일부를 다시 대기로 되돌리는 양방향의 플릭스를 갖는다. 식물이 광합성을 통해 CO₂를 흡수하여 생산한 총 유기물 양을 총일차생산량이라고 하며, 여기서 식물호흡 (autotrophic respiration, Ra)에 의한 유

기물의 소비를 제하면 순일차생산량 (NPP)이 된다. 대기권 사이의 CO₂의 흐름에 대한 순생태계 교환량 (net ecosystem exchange, NEE)은 작물 및 식물에 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 4).

$$NEE = Re - GPP \quad (4)$$

Re는 작물 및 토양의 주간호흡 (ReD)과 야간호흡 (ReN)의 합으로 나타낼 수 있는데, Re는 Nighttime data에 의해 결정되며 일반적으로 Re는 Daytime이 Nighttime 보다 약간 높지만 간편함을 위해 동일하다고 본다. 여기서, NEE는 생산자에 의한 실질적인 탄소고정량이 되며 탄소의 양을 나타낸다. 전술한 수식에 의하여 산림생태계의 탄소순환을 정량화할 수 있으며, 특히 탄소순환에서 각각의 저장고가 차지하는 상대적인 비중을 구하여 이들의 중요성을 구명할 수 있다.

나. CO₂ 산정을 위한 생태계호흡량 (Re) 산정

생태계 호흡량을 산정하기 위해 van Gorsel et al. (2007)에 의해 제시된 방법을 참조하였다. 이 방법은 에디 공분산방법으로 관측된 NEE와 저류량의 합의 최대값이 야간 이류효과가 아직 발생되기 전인 해질녘 무렵에 나타나며, 따라서 이때의 값을 사용해서 Re에 대한 기준 함수를 계산한다. 이 방법으로 계산된 Re 값은 독립적으로 다르게 계산된 Re 값과 비교했을 때 거의 완벽한 일치치를 보였다. KoFlux 자료의 경우에도 해질녘 부근인 오후 6시에서 8시 사이에 최대값이 나타났으며, 이 값을 이용하여 대기 온도로 Re를 표현하였을 때 모든 자료를 사용했을 때 보다 상관관계가 크게 증가하였다. 이에 따라 생태계 호흡량 함수는 다음의 식을 사용하였다

(Llyod and Taylor, 1994):

$$Re = R_{ref} \exp\left(E_0 \left[\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right]\right) \quad (5)$$

여기서 R_{ref} 는 기준 생태호흡량, T_{ref} 는 기준 온도 (=10°C), E_0 는 활성화 에너지, T_0 는 -46.02°C, 그리고 T_a 는 기온이다. R_{ref} 와 E_0 는 기온과의 회귀 과정을 통하여 얻게 되는 경험상수를 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

1. MODIS GPP 운량 감쇄 보정 결과

구름 보정전 GPP의 시계열곡선은 7월과 8월 중에 GPP 값이 등락이 나타나는데 이는 장마기간 중의 구름 영향으로 사료된다. 따라서 이를 보정하기 위해 QC (Quality control) Flag에서 [0, 1, 32, 33, 64, 65, 96, 97]에 해당되는 픽셀에서의 GPP값을 제외하고 오염되지 않은 픽셀에서의 GPP값으로부터 IDW보간 방법을 이용하여 Gap filling을 실시하였다 (Fig. 3). 그 결과 장마 기간 동안 구름에 의해 오염되어 GPP 값이 등락되는 경향을 개선할 수 있었다. Fig. 4는 용담댐 유역에서 보정전 GPP와 보정후 GPP를 나타낸 것이다. 보정전 GPP는 2008년 6월부터 8월까지 감소하는 경향을 나타내며, 이 외에도 2009년 5월, 2011년 4월부터 5월의 기간과 2012년 8월부터 9월까지의 기간에 GPP 값이 불규칙적으로 등락하는 경향을 나타낸다. 여기서 구름에 의해 오염된 픽셀을 제외한 보정후 GPP 그래프는 같은 기간에서 불규칙적으로 등락하는 경향이 많이 감소하는 모습을 보였다.

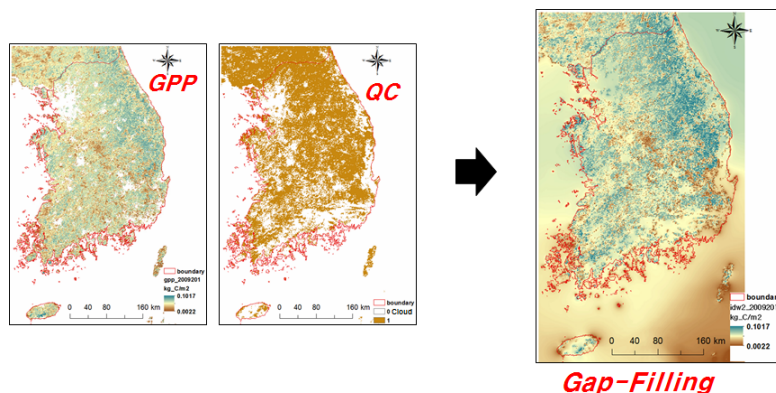


Fig. 3 The process of Gap-Filling for cloud correction : GPP (Gross Primary Production), QC (Quality Control), Gap-Filling (Interpolation)

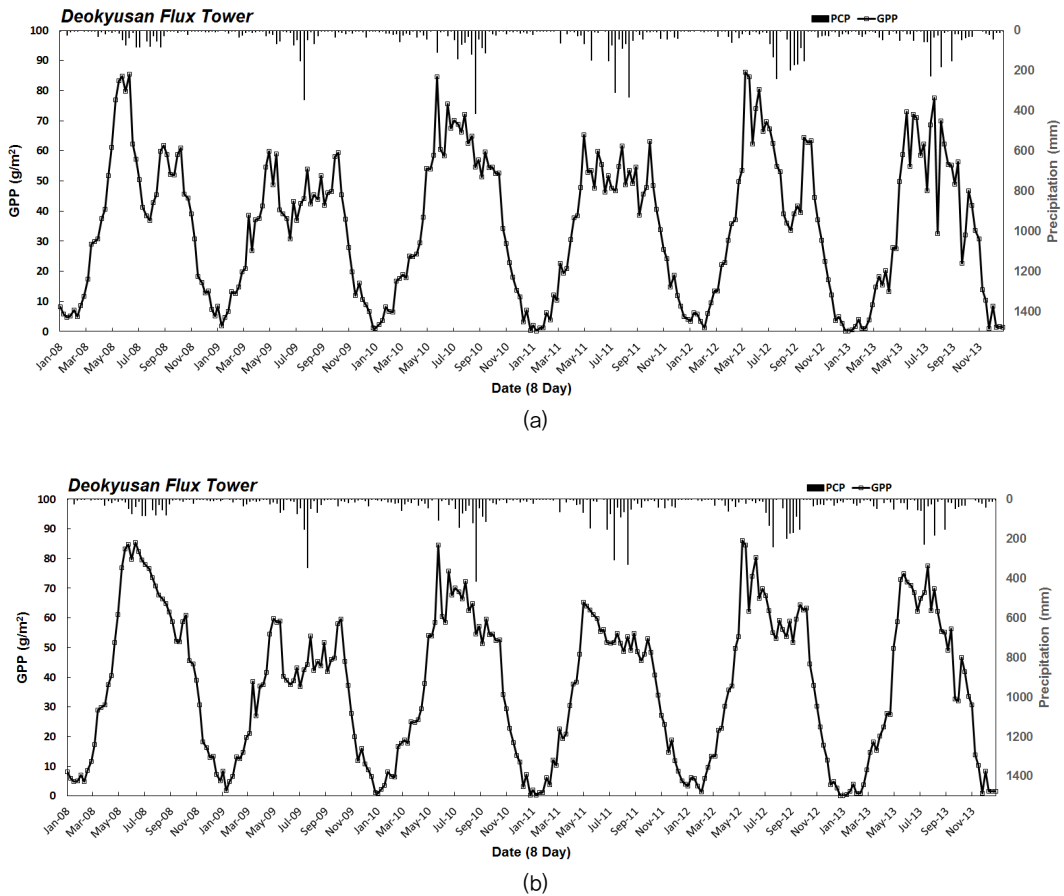


Fig. 4 Time series of 8-day GPP (Gross Primary Production) : (a) before cloud correction PCP (Precipitation) and (b) cloud corrected images

2. 생태계호흡량 (R_e) 산정 결과

본 연구에서는 R_e 산정을 위해 모든 시험유역에서의 Flux 측정자료를 이용하였다. R_e 를 산정하기 위해서는 R_{ref} 는 기준 생태호흡량과 E_0 활성화에너지를 경험적으로 산정해야 한다. 기존연구에서는 중국남동쪽(26° 44' 52" N, 115° 03' 47" E, 표고 102 m)에서 직접 실험하여 얻어진 기준 생태호흡량과 활성화에너지는 경험상수로서 E_0 는 309 K, R_{ref} 는 0.077 mg/m²·s의 값을 산정하였다(Wen et al., 2006). 이는, 남한유역에 기후 및 지형적인 조건과 다르게 나타날 수 있기 때문에 국내의 적용될수 있는 경험상수 값을 산정해야 한다. 경험상수의 산정방법은 van Gorsel et al. (2007)과 Hong et al. (2009)이 제시한 방법을 이용하였다. 해질녘 부근인 오후 6시에서 8시 사이에 CO₂ Flux가 최대값이 나타나며, 이때의 값을 그 날의 R_e 값으로 정하고 대기 온도와 Lloyd and Taylor방법의 R_e 식으로부터 회귀식을 산정하여 R_{ref} 는 기준 생태호흡량,과 E_0 활성화에너지의 국내 경험상수를 산정

한다. 이 방법은 기존 연구에서 증명된 방법으로 야간 난류 플렉스 값을 산정할 때 널리 이용되고 있다. 그 결과 용담댐유역에서의 R_{ref} 는 0.054 mg/m²·s, E_0 는 204.8 K으로 나타났다. 산정된 경험상수를 적용한 시험유역별 R_e 값의 시계열 그래프는 Fig. 5와 같다.

3. Flux CO₂와 MODIS CO₂ 결과비교

MODIS GPP로부터 산정된 CO₂와 Flux CO₂의 결과그래프는 Fig. 6과 같다. Flux CO₂는 자료 처리에서 여러 가지 원인으로 인해서 튀는 자료들이 발생한다. 이러한 자료들을 제거하기 위해서 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용하여 d 지수를 산정하여 이 값의 절대값의 중앙값으로부터 벗어난 정도를 가지고 튀는 자료를 판단하여 제거하였다. 결측자료를 보완하기 위해 결측된 Flux CO₂는 평균값으로 대체하여 보완하였다.

결과에 유의성을 판단하기 위해 결정계수 (determination

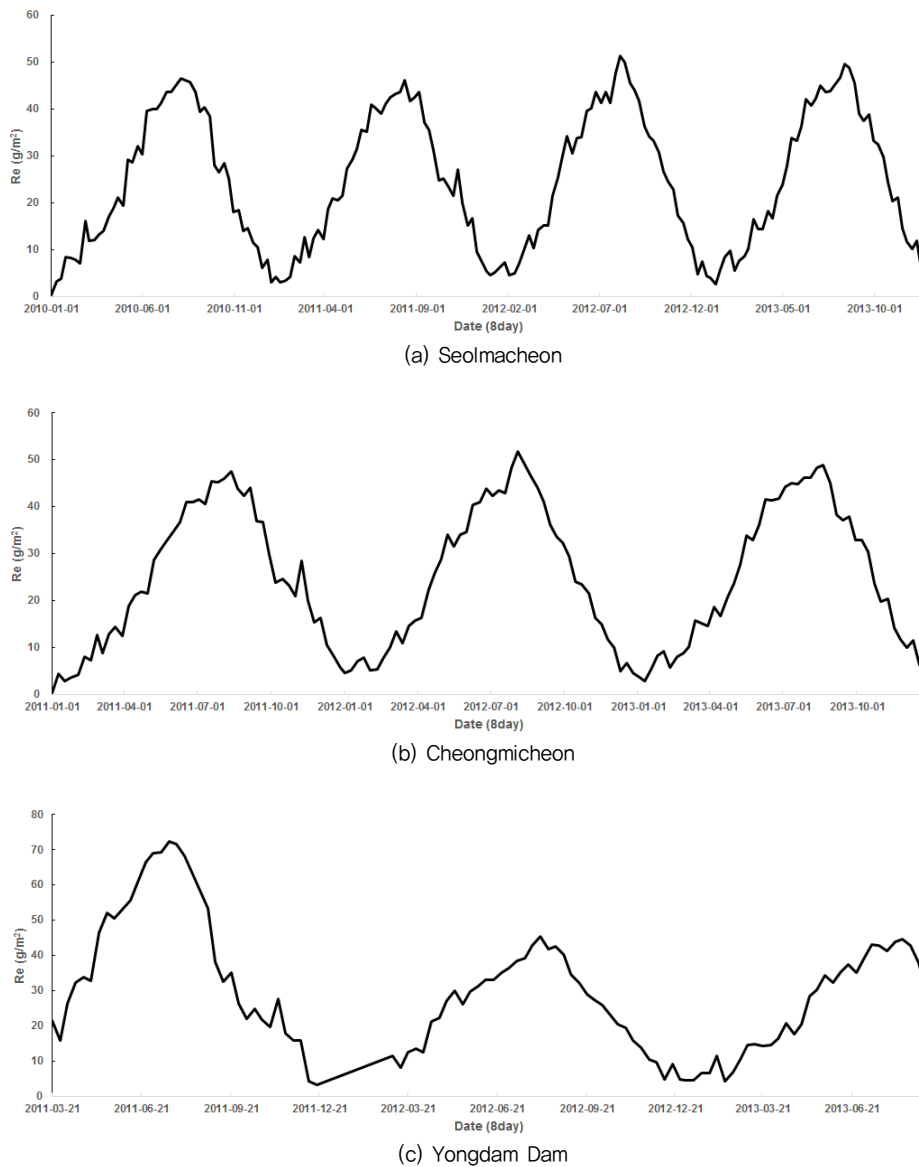


Fig. 5 Time series of 8-day Re (Ecosystem respiration) : (a) Seolmacheon, (b) Cheongmicheon and (c) Yongdam Dam

of coefficient, R^2)를 사용하였다. 설마천, 청미천 및 용담댐의 R^2 는 각각 0.60, 0.56 및 0.55로 나타났다 (Fig. 7). 일반적으로 R^2 값이 0.5보다 클 때 활용할 수 있는 값이라는 것을 나타내므로 (Santhi et al., 2001; Van Liew et al., 2007), 본 연구에서 산정한 GPP값은 실측 자료와 일정한 유의성을 나타내는 것으로 판단된다.

설마천 유역은 장마기간 이전에 5월~6월에서 CO_2 가 최대값이 나타나는 경향이 뚜렷하게 나타났으며 이외에 기간에서는 일정하게 나타났다. 청미천 유역에서는 뚜렷하게 CO_2 가 증가하는 기간 없이 일정하게 나타났으며 장마기간에 감소되는 경향을 나타냈다. 용담댐유역에서는 자료기간이 다른 두

유역에 비해 짧아 일반화된 경향성을 나타내기에는 미비하지만 장마기간에 감소되는 경향을 나타냈다. 세 시험유역 모두 뚜렷하게 최대값을 나타내는 기간 없이 일정하게 CO_2 양을 나타냈고 장마기간에 감소하는 경향성을 나타냈다. 이는, Flux 및 MODIS 영상 모두 장기간에 장마기간에 광합성이 감소하여 최종적으로 GPP의 감소를 초래하는 것으로 볼 수 있다.

4. CO_2 심도분석

CO_2 심도분석을 위해 계절별 평균 CO_2 의 양과 결정계수 및 강수량을 Table 3~Table 5까지 분석하여 나타냈다. 계절

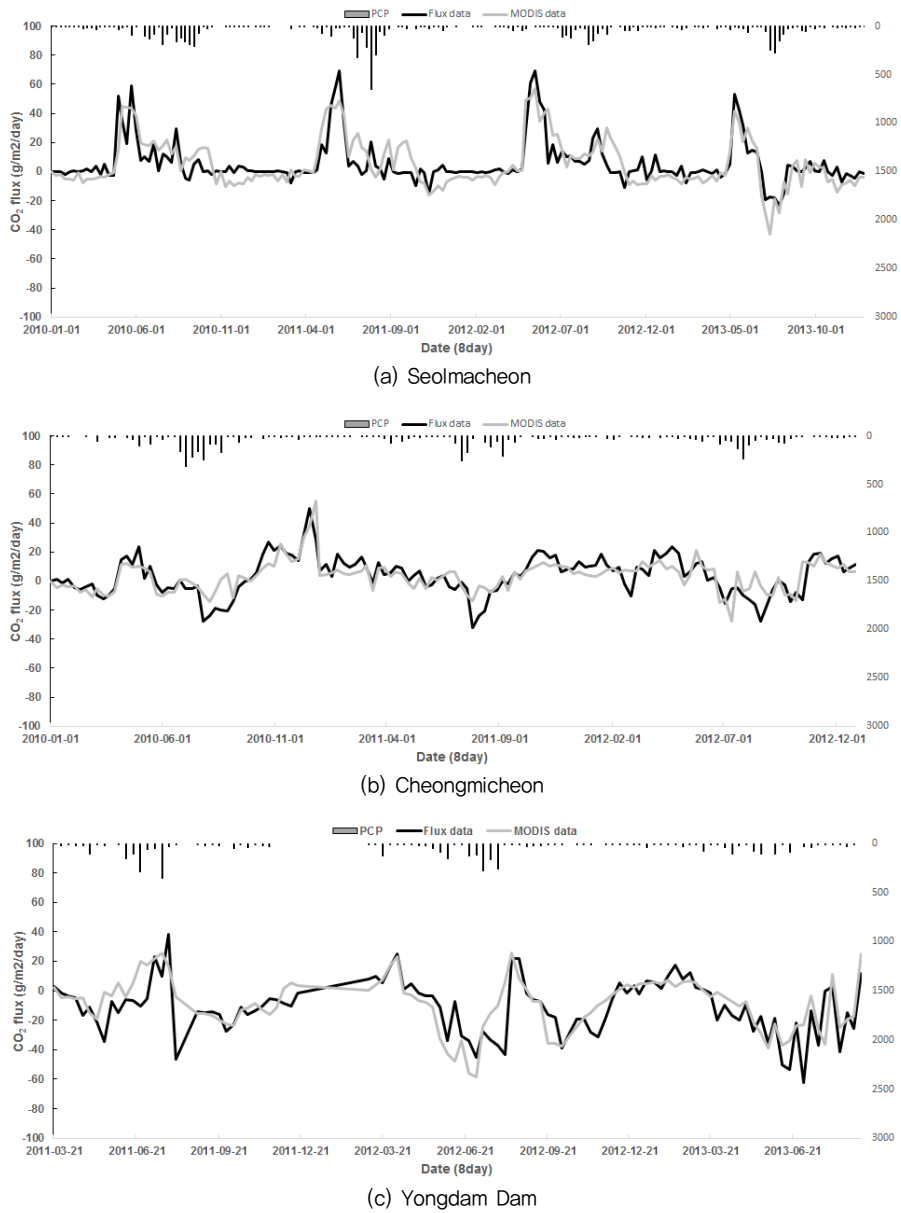


Fig. 6 Comparison of results between CO₂_Flux data and CO₂_MODIS: (a) Seolmacheon, (b) Cheongmicheon and (c) Yongdam Dam

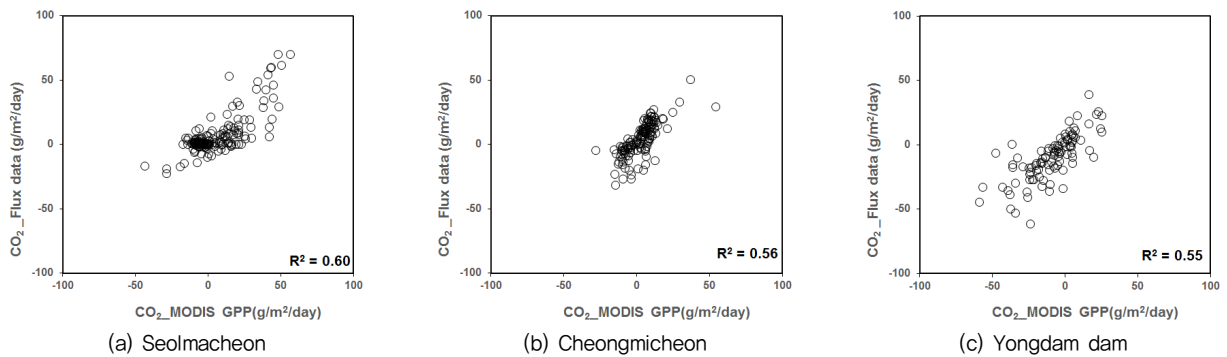


Fig. 7 Comparison of R^2 between CO₂_Flux data and CO₂_MODIS GPP: (a) Cheongmicheon, (b) Seolmacheon and (c) Yongdam dam

Table 3 Comparison of seasonal CO₂ between Flux and MODIS from Seolmacheong

Period	PCP (mm)	Flux CO ₂ (g/m ²)			MODIS CO ₂ (g/m ²)			R ²
		Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	
Spring	70.3	53.1	178.4	-8.5	46.2	142.4	-19.6	0.86
Summer	394.1	32.8	113.5	-78.2	46.4	133.6	-118.2	0.36
Autumn	101.3	3.1	45.4	-14.3	8.7	89.8	-39.2	0.78
Winter	26.9	-0.2	7.3	-8.2	-18.9	-10.0	-30.0	0.50

Table 4 Comparison of seasonal CO₂ between Flux and MODIS from Cheongmicheon

Period	PCP (mm)	Flux CO ₂ (g/m ²)			MODIS CO ₂ (g/m ²)			R ²
		Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	
Spring	251.4	26.5	78.7	-36.8	16.3	43.0	-32.7	0.87
Summer	1029.6	-37.8	12.2	-83.2	-13.4	13.6	-40.4	0.23
Autumn	282.3	29.4	72.1	-21.7	22.2	57.4	-25.9	0.83
Winter	82.4	37.6	124.9	-16.2	27.8	137.7	-27.8	0.75

Table 5 Comparison of seasonal CO₂ between Flux and MODIS from Yongdam Dam

Period	PCP (mm)	Flux CO ₂ (g/m ²)			MODIS CO ₂ (g/m ²)			R ²
		Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	
Spring	353.5	-22.3	38.9	-81.1	-20.2	28.6	-88.6	0.69
Summer	853.9	-68.6	66.0	-144.2	-46.0	81.6	-179.9	0.23
Autumn	121.5	-52.2	12.1	-78.1	-49.5	24.8	-85.0	0.54
Winter	34.4	17.1	48.2	-20.1	12.7	22.9	4.6	0.50

별 동향을 분석하기 위해 각각 Spring (3월~5월), Summer (6월~8월), Autumn (9월~11월), Winter (12월~2월)로 구분하여 비교 분석하였다. CO₂의 평균 발생량을 살펴보면 일반적으로 여름에서는 강우 횟수와 강우량에 따라 광합성량보다 호흡량이 많아져 음의값으로 배출되는 CO₂의 양이 증가하여 상대적으로 낮은 CO₂의 값을 나타냈다. 봄 및 가을에서 상대적으로 광합성량의 증가로 인해 양의값으로 들어오는 CO₂의 양이 증가하여 상대적으로 높은 CO₂의 값을 나타냈다. 또한, 여름에 CO₂의 최대값과 최소값의 차이가 가장 크게 나타났으며 이는 여름에 CO₂의 편차와 산포도가 가장 큰 것으로 나타나며 다른 계절에 비하여 불규칙적으로 CO₂의 흐름이 나타난다고 볼 수 있다.

계절별 상관성 분석의 결과 설마천 유역에서는 봄 및 가을이 Flux 및 MODIS CO₂의 결정계수가 각각 0.86 및 0.78로 가장 높았으며 여름에 가장 낮게 나타났다. 청미천 유역에서는 봄, 가을 및 겨울의 R²가 각각 0.87, 0.83, 0.75로 매우 높게 나타났으며 여름에 가장 낮게 나타났다. 용담댐 유역에서는

R²는 봄 및 가을에 0.69 및 0.54로 가장 높았으며 여름에 0.23으로 가장 낮게 나타났다. 이러한 경향은 Tian et al. (2003)이 제시한 연구결과에서도 나타난다. Tian et al. (2003)은 아시아 지역에서의 CO₂와 탄소(C)의 누적량 및 상대적 기여도를 평가하여 몬순아시아지역에서의 CO₂ 상관성 및 편차가 다른 아시아 지역에 비해 크게 나타남을 보였다. 본 연구의 세 시험 유역 모두 봄 및 가을에 정확성이 가장 높았으며 몬순기후에 영향을 받는 여름에 매우 낮게 나타났다. 이는 강우량뿐만 아니라 강우횟수에 따라 Flux 결측 관측의 증가와 위성영상에서의 감쇄효과에 따라 나타난다고 볼 수 있다. 따라서, 여름기간동안의 산정된 결과는 활용성이 떨어진다고 판단된다.

본 연구는 세 시험유역의 연평균 CO₂량을 산정한 결과 설마천 유역은 연평균 3,232.4 ton (Flux CO₂), 4,829.3 ton (MODIS CO₂)으로 나타났으며 청미천 유역은 연평균 299,650.6 ton (Flux CO₂), 234,089 ton (MODIS CO₂)으로 나타났다. 용담댐 유역에서는 연평균 493,530.4 ton (Flux CO₂), 462,233.3 ton (MODIS CO₂)으로 나타났다.

V. 결론

본 연구에서는 Flux 자료를 이용하여 산정된 CO₂와 MODIS GPP로부터 산정된 MODIS CO₂를 비교 분석하여 MODIS CO₂의 산정방법에 대한 평가와 적용성 증명하고 현재 플렉스 타워 등 몇 개의 시험유역에서만 측정되고 있는 CO₂를 추후 위성영상을 이용하여 광역적으로 모든 지역에서 산정하기 위한 기반연구로 그 활용성을 높이고자 한다. 시험유역으로 플렉스 타워가 설치되어 CO₂가 관측되고 있는 설마천, 청미천 및 용담댐 유역을 대상으로 플렉스 타워와 동일한 위치의 MODIS GPP 8 day 자료를 구축하고 구름감쇄효과 보정을 위한 Gap-filling 작업을 실시하여 GPP를 보정하였으며 플렉스 타워에서 Eddy Covariance 방법으로 관측된 Flux CO₂는 d지수를 사용하여 튀는 자료 제거와 결측 자료에 평균값을 사용하여 8 day로 구축하였다. 대기온도를 매개변수로 Lloyd and Taylor 방법으로부터 얻은 R_e를 사용하여 MODIS GPP로부터 MODIS CO₂를 산정하였다.

실측자료와 비교하여 MODIS CO₂의 신뢰성 및 활용성을 평가하기 위해 각각의 추정된 값을 비교하였고 그 결과 MODIS CO₂는 Flux CO₂와 비교적 높은 상관성을 나타냈다. 결과에 정확성을 판단하기 위해 결정계수 (determination of coefficient, R²)를 사용하였다. 설마천, 청미천 및 용담댐의 R²는 각각 0.60, 0.56 및 0.55로 나타났다. 이 값은 CO₂의 심도분석을 위해 계절별 CO₂ 동향을 분석하였다. 각각 Spring (3월~5월), Summer (6월~8월), Autumn (9월~11월), Winter (12월~2월)로 나누어 비교하였다. 계절별 상관성 분석의 결과 설마천 유역은 봄 및 가을이 Flux 및 MODIS CO₂의 결정계수가 각각 0.86 및 0.78로 가장 높았으며 여름에 가장 낮게 나타났다. 청미천 유역은 봄, 가을 및 겨울의 R²가 각각 0.87, 0.83, 0.75로 매우 높게 나타났으며 여름에 가장 낮게 나타났다. 용담댐 유역의 R²는 봄 및 가을에 0.69 및 0.54로 가장 높았으며 여름에 0.23으로 가장 낮게 나타났다. 세 시험유역 모두 봄 및 가을에 정확성이 가장 높았으며 몬순기후에 영향을 받는 여름에 매우 낮게 나타났다. 이는 강수량 뿐만 아니라 강우횟수에 따라 Flux 결측의 증가와 위성영상에서의 감쇄효과에 따라 나타난다고 볼 수 있다. 여름기간동안의 산정된 결과는 활용성이 떨어진다고 판단된다. 여름에 대한 예측치가 낮게 나타나는 이유는 비교대상인 위성자료 및 Flux 자료가 비가 내리거나 구름에 의해서 오차가 나타나기 때문이다. 위성자료는 구름에 대한 오차 보정을 실시하였으나 동시에 Flux 자료에 대한 강우에 따른 자료 구축의 불확실성을 제거해야 한다. 이는, 기술적인 측면이라 본 연구에서 진행하지 않았으며 이를 보완하기 위한 방법으로는 여름에 강우 및 무강우 날을 구분하여 상관성 분석을 실시하여 예측결과를 비교해야 한다.

다. 그러나 Flux 자료에 충분치 않은 자료와 MODIS 영상의 일 단위 자료에 획득이 어렵기 때문에 추가 분석은 매우 제한적이라 자료 개수가 충분히 확보가 될 때 추가적인 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구 결과 설마천 유역에서는 연평균 3,232.4 ton (Flux CO₂), 4,829.3 ton (MODIS CO₂)으로 나타났으며 청미천 유역은 연평균 299,650.6 ton (Flux CO₂), 234,089 ton (MODIS CO₂)으로 나타났다. 용담댐 유역에서는 연평균 493,530.4 ton (Flux CO₂), 462,233.3 ton (MODIS CO₂)으로 나타났다.

MODIS CO₂와 Flux CO₂의 차이는 몬순기후의 특성상 여름철에 집중되는 강우로 인한 구름 및 강우 영향이 Flux 자료의 결측과 위성영상자료의 오류로 여름철에 가장 많이 나타나는 것으로 보인다. 추가적으로 충분한 자료기간 보유와 Flux 자료의 결측 보완 알고리즘과 위성영상 자료의 상세화로 일 단위별 CO₂의 양을 비교하여 유역별 CO₂ 산정방법을 일반화시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 구름영향 이외에도 CO₂는 일사량 및 기온의 변화가 영향을 미치기 때문에 일사량과 비교하여 CO₂ 흐름에 대한 상관성 파악이 필요하며 이는 미래 기후변화에 대한 예측 연구에 반영될 수 있다. 결과적으로 MODIS CO₂ 자료는 봄, 가을에서는 실측값과 비교하여 상당히 높은 상관성을 나타냈다. 따라서, 몬순기후 특성상 여름과 눈이 오는 날 운량이 많아지는 겨울에 추가적인 보정을 수행함으로써 신뢰성 있는 자료로 평가될 수 있을 것이며 특정지역에 한하여 측정되는 Flux CO₂ 자료에 비해 MODIS CO₂ 자료는 광범위한 지역에 CO₂를 측정하여 자료를 구축할 수 있을 뿐만 아니라 남한에서의 탄소수지 연구에 실용적이고 유용한 생태계 순환의 지표로 활용될 수 있는 활용성이 큰 자료로 평가할 수 있다.

사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (11 기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Choi, T., J. Kim, and J. I. Yun, 1999. On using the eddy covariance method to study the interaction between agro-forest ecosystems and the atmosphere. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 1(1): 1-15 (in Korean).
2. Cohen, W.B. and C.O. Justice. 1999. Validating MODIS terrestrial ecology products: linking in situ and satellite measurements. *Remote Sensing of Environment* 70: 1-4

3. Guo, M., X. Wang, J. Li, K. Yi, G. Zhong, and H. Tani. 2012. Assessment of global carbon dioxide concentration using MODIS and GOSAT data. *Sensors* 2012, 12, 16368-16399; doi:10.3390/s121216368.
4. Heinsch, F. A., M. Reeves, C. F. Bowker, P. Votava, S. Kang, C. Milesi, M. Zhao, J. Glassy, W. M. Jolly, J. S. Kimball, R. R. Nemani, and S. W. Running, 2003. User's guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products, NASA MODIS Land Algorithm. <http://www.forestry. umt.edu/ntsg/>.
5. Hong, J. K., H. J. Kwon, and J. Kim, 2009. Measurement of Evapotranspiration by Eddy-Covariance Technique. 2-4. TR 2009-13. Sustainable Water Resources Research Center (in Korean).
6. Hong, J., H. Kwon, J. H. Lim, Y. H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009. Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(1): 19-26 (in Korean).
7. Hong, J. Y., C. S. Shim, M. J. Lee, G. H. Baek, W. K. Song, and Y. H. Park, 2011. Net primary production changes over Korea and climate factors. *Korean Journal of Remote Sensing* 27(4): 467-480 (in Korean).
8. Hong, W. Y., H. J. Shin, and S. J. Kim, 2007. Extraction of Snow Cover Area and Depth using MODIS Image for 5 River Basins in South Korea. *KCID J.* 14(2): 65-75 (in Korean).
10. Houghton, R. A., and J. L. Hackler, 2001. Carbon Flux to the Atmosphere From Land-use Changes: 1850 to 1990. NDP-050/R1, *Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.*
11. Hur, Y.M. and Choi, M.H. 2011. Advanced Microwave Scanning Radiometer E Soil Moisture Evaluation for Haenam Flux Monitoring Network Site. *Korean Journal of Remote Sensing* 27(2): 131-140 .
12. Joh, H.K., J.W. Lee, H.J. Shin, G.A. Park and S.J. Kim. 2010. Evaluation of Evapotranspiration and Soil Moisture of SWAT Simulation for Mixed Forest in the Seolmacheon Catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 289-297.
13. Kang, M., H. Kwon, J. H. Lim, and J. Kim, 2009. Understory evapotranspiration measured by eddy covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(4): 233-246 (in Korean).
14. Kang, S., S.W. Running, J. Lim, M. Zhao, C. Park, and R. Loehman, 2003. A MODIS-based climatological phenology model for detecting onset of growing seasons in temperate mixed forests in Korea. *Remote Sensing of Environment* 86: 232-242.
15. Kang, S, K., 2005. Analysis on Cloud-Originated Errors of MODIS leaf Area Index and Primary Production Images : Effect of Monsoon Climate in Korea. *Journal of Ecology and Field Biology* 29(6): 215-222.
16. Kang, S. K., Y. I. Kim, and Y. J. Kim, 2005. Errors of MODIS product of Gross Primary Productivity by using Data Assimilation Office Meteorological Data. *Korean Journal of Agricultural and Forest meteorology* 7(2): 171-183 (in Korean).
17. Kang, S. K., K. C. Jang, B. R. Lee, and S. H. Kim, 2008. User's manual for MODIS data processing and mapping evapotranspiration. 3-6. TR 2008-13. Sustainable Water Resources Research Center.
18. Kim, D. E., J. J. Baek, S. W. Jung, and M. H. Choi, 2013. Net radiation estimation using flux tower data and integrated hydrological model: For the seolmacheon and Chungmicheon watershed. *J. Korea Water Resources Association* 46(3): 301-314 (In Korean).
19. Kim, N. W., J. E. Lee, I. M. Jung, and D.P. Kim, 2008. Hydrologic Component Analysis of the Seolma-Cheon Watershed by Using SWAT-K Model. *Journal of the Environmental Sciences* 17(12): 1363-1372 (in Korean).
20. Kim, Y. I., S. K. Kang, and J. Kim, 2007. Enhancing the Reliability of MODIS Gross Primary Productivity (GPP) by Improving Input Data. *Korean Journal of Agricultural and Forest meteorology* 9(2): 132-139 (in Korean).
21. K-water, 2013, Report on technical assistance of Deokyusan flux tower evapotranspiration estimation and analysis (in Korean).
22. Kwon, H., and J. Kim, 2010. KoFlux issue : KoFlux's progress: Background, status and direction. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 241-263 (in Korean).
23. Kwon, H., S. Park, M. Kang, J. Yoo, R. Yuan, and J. Kim, 2007. Quality control and assurance of eddy covariance data at two KoFlux sites. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 9(4): 260-267 (in Korean).
24. Lloyd, J. and J. A. Taylor, 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecol.* 8, 315-323.
25. Morisette, J.T., J.L. Privette and C.O. Justice. 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment* 83: 77-96.
26. Myneni, R.B., S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J.L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, G.R. Smith, A. Lotsch, M. Friedl, J.T. Morisette, P. Votava, R.R. Nemani and S.W. Running, 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 83: 214-231.
27. Park, J.Y., H. Jung, C.H. Jang and S.J. Kim. 2014. Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and

- SWAT Model. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(3): 19-29 (in Korean).
28. Running, S. W., P. E. Thornton, R. R. Nemani, and J. M. Glassy, 2000: Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. *Methods in Ecosystem Science*, O. E. Sala, R. B. Jackson, R. B., H. A. Mooney, and R. W. Howarth (Eds.), *Springer-Verlag*. New York.
 29. Santhi, C, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck. 2001: Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc.* 37(5): 1169-1188
 30. Sellers, P. J., C. J. Tucker, G. J. Collatz, S. O. Los, C. O. Justice, D. A. Dazlich, and D. A. Randall, 1994: A global 1o by 1o NDVI data set for climate studies: 2. The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3519-3545.
 31. Tian, H., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, S. Pan, J. Liu, A. D. Mcguire, and B. Moore, 2003. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change* 37: 201-217.
 32. Turner, D.P., W. Ritts, W.B. Cohen, S.T. Gower, M. Zhao, and S.W. Running, 2003. Scaling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment* 88: 256-270.
 33. Van Gorsel, E., R. Leuning, H. Cleugh, H. Keith, and T. Suni, 2007. Nocturnal carbon efflux: reconciliation of eddy covariance and chamber measurements using an alternative to the u*-threshold filtering. *Tellus* 59B, 397-403.
 34. Van Liew, M. W., T. L. Veith, D. D. Bosch, and J. G. Arnold, 2007: Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. *J. Hydrologic Eng.* 12(2): 173-189
 35. Wen, K. F., G. R. Yu, X. M. Sun, Q. K. Li, Y. F. Liu, L. M. Zhang, C. Y. Ren, Y. L. Fu, and Z. Q. Li, 2006. Soil moisture effect on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical Pinus plantation of southeastern China. *Agricultural and Foreset Meteorology* 137: 166-175.
 36. Zhao, M., and S. W. Running, 2010. Drought induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 329(5994): 940-943.
 37. Zhao, M., F.A. Heinsch, R.R. Nemani, and S.W. Running, 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global dataset. *Remote Sensing of Environment* 95: 164-176.