



## 설마천 유역 CO<sub>2</sub> Flux 실측 자료에 의한 총일차생산성 (GPP)과 MODIS GPP간의 비교 평가

### Evaluation of MODIS Gross Primary Production (GPP) by Comparing with GPP from CO<sub>2</sub> Flux Data Measured in a Mixed Forest Area

정충길\* · 신형진\* · 박민지\* · 조형경\* · 김성준\*\*†

Jung, Chung-Gill · Shin, Hyung-Jin · Park, Min-Ji · Joh, Hyung-Kyung · Kim, Seong-Joon

#### ABSTRACT

In this study, In order to evaluate reliable of MODIS GPP, the MODIS GPP and Flux tower measured GPP were compared to evaluate the use of method on 8 days composite MODIS GPP. The 2008 Flux data (CO<sub>2</sub> Flux and air temperature) measured in Seolmacheon watershed (8.48 km<sup>2</sup>) were used. The Flux tower GPP was estimated as the sum of CO<sub>2</sub> Flux and R<sub>ec</sub> (ecosystem respiration) by Lloyd and Taylor method (1994). The summer Monsoon period from June to August mostly contributed the underestimation of MODIS GPP by cloud contamination on MODIS pixels. The 2008 MODIS GPP and Flux tower GPP of the watershed were 1133.2 g/m<sup>2</sup>/year and 1464.3 g/m<sup>2</sup>/year respectively and the determination coefficient (R<sup>2</sup>) after correction of cloud-originated errors was 0.74 (0.63 before correction). Even though effect of Cloud-Originated Errors was eliminated, Solar radiation and Temperature are affected at GPP. Measurement of correct GPP is difficult. But, If errors of MODIS GPP analyze on Cloud Moonsoon Climate in Korea and eliminated effect of Cloud-Originated Errors, MODIS GPP will be considered GPP increasing of 9 %. There, Our results indicate that MODIS GPP show reliable and useful data except for summer period in Moonsoon Climate.

**Keywords:** MODIS GPP; Flux GPP; CO<sub>2</sub>; Lloyd and Taylor

#### 1. 서 론

지구 온난화는 전 지구적, 지역적으로 수문 현상과 강우 현상에 변화를 준다 (Houghton et al., 2001). CO<sub>2</sub>의 증가로 인한 지구 온난화 문제는 지속가능한 경제발전과 삶의 질을 위협하는 원인으로 인식되고 있다. 특히 지구 온난화 문제에 대한 국가 차원의 정책을 지원하고 일반인들의 의식 수준을 높이기 위해서는 탄소순환이 일어나는 메커니즘에 대한 이해가 필수적이다 (Sellers et al., 1996). 지구기후변화의 주 원인물질로 주목 받고 있는 대기 중 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> Flux 자료는 순 일차생산성 (Net Primary Productivity, NPP)과 총일차생산성 (Gross Primary Productivity, GPP)에 의해 영향을 받으며 CO<sub>2</sub>의 흡수와 발원으로 NPP와 GPP는 결정된다. 이러한 이유로 탄소 생태계순환의 흐름을 파악하기 위해서는 CO<sub>2</sub> 수치를 정량화 할 수 있는 GPP 산정이 중요시 된다. 따라서, 생태계 탄소순환과정을 정량화하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있으며 이중, 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 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 GPP 자료를 만

\* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과

\*\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749

Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2010년 11월 29일 투고

2011년 1월 14일 심사완료

2011년 2월 5일 게재확정

들어 낼 필요가 있으며 현재 MODIS GPP 산출물의 신뢰도를 평가하기 위한 다양한 노력들이 진행되고 있다 (Cohen and Tustice, 1999; Morissette et al., 2002; Myneni et al., 2002; Kang et al., 2003; Turner et al., 2003; Zhao et al., 2005). 따라서, 여러 측면에서 널리 활용되고 있는 MODIS 위성영상에 대해 신뢰성 있는 자료로 판단 할 수 있는지에 여부를 확인하고자 실측값과 MODIS 위성자료를 비교하여 오차를 판단하는 목적으로 본 연구를 시작하였으며 특히, 지구온난화에 따른 생태계 탄소흐름에 대한 관심이 고조됨에 따라 CO<sub>2</sub>수치를 정량화 할 수 있는 MODIS GPP 위성자료에 대한 연구를 진행하고 자 한다.

본 연구에서는 MODIS GPP의 궁극적으로 알고리즘을 개선하기보다는 실측자료와 비교하여 MODIS GPP의 신뢰성 및 활용성을 평가하고자 한다. 따라서, 생태계에서의 잠재적인 CO<sub>2</sub>의 감소와 대기 중 증가 하고 있는 CO<sub>2</sub> 규모의 파악을 위하여, 현재 CO<sub>2</sub> Flux 자료가 측정되고 있는 설마천 유역을 대상으로 CO<sub>2</sub>의 간접적인 지표로 GPP를 구하고자 하였다. MODIS GPP의 종합적인 평가를 내리기 위하여, Flux Tower에서 측정된 실측자료를 이용하여 산정된 GPP와 MODIS 위성영상으로부터 얻은 GPP 결과와의 비교 분석을 실시함으로써 MODIS GPP의 신뢰성 및 활용성을 판단하고자 한다. 또한, 몬순기후를 가진 우리나라를 대상으로 MODIS GPP 영상에 오차량을 평가하여 계절에 따른 MODIS GPP의 신뢰성 및 활용정도를 분석하여 판단하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

본 연구에서는 MODIS GPP 자료의 신뢰성, 활용성을 평가하기 위하여 Terra MODIS 위성영상을 통해 제작 된 GPP Product를 수집하여 설마천 유역의 GPP를 추출한 후, 실측자료를 이용하여 산정한 GPP와 비교하였다. 실측자료로 Flux 자료를 이용하였으며 Flux 자료로부터 산정한 GPP를 Flux GPP라 정의 하였다. GPP product로 NASA에서 제공하는 MOD17A2 product를 이용하여 2008년 설마천 유역의 GPP 영상을 Import 하였고 설마천 Flux Tower에서 Eddy Covariance 방법으로 얻은 Flux 자료를 이용하여 Flux GPP를 산출하였다 (Fig. 1). MOD17A2 product의 생산요소들로  $\epsilon$ 은 식물의 복사사용효율 (radiation use efficiency)을 나타내며,  $\epsilon_{max}$ 는 최대복사사용효율,  $T_{min}$ 은 일최저기온, VPD는 포차,  $R_s$ 는 전천단파일사량이며, FPAR는 식물이 흡수한 PAR의 비율로서 0에서 1의 값을 갖으며 Flux GPP의 생산요소들로  $F_c$ 는 CO<sub>2</sub> Flux 자료이고  $R_{ec}$ 는 생태계 호흡량을 나타낸다.

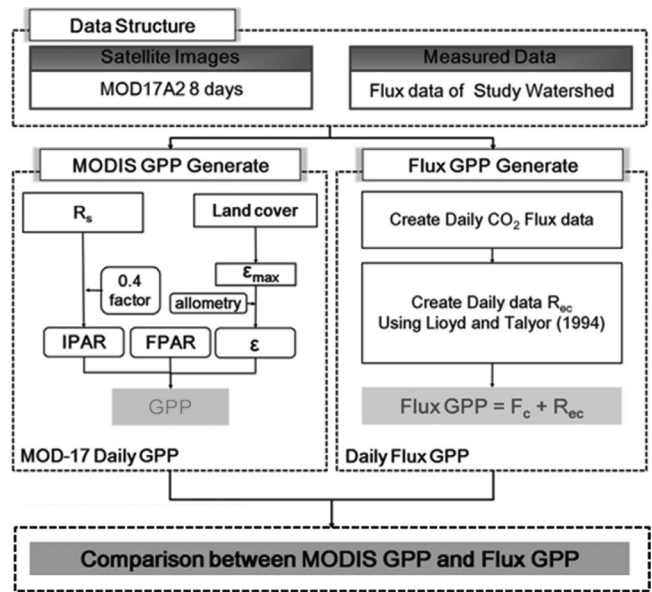


Fig. 1 The flow of study procedure

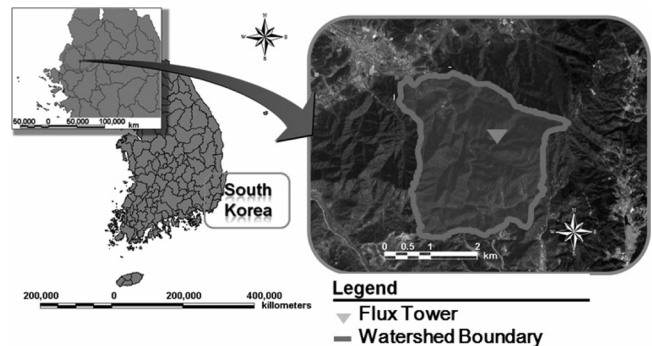


Fig. 2 The study area (Seolmacheon watershed)

### 1. 연구대상지역

연구 대상 지역으로 유역면적 8.48 km<sup>2</sup>의 산림면적이 전체 유역면적의 96.2% (8.22 km<sup>2</sup>)인 경기도 파주 적성면 가월리에 설마천 유역을 선정하였다 (Fig. 2). 설마천 유역은 전형적인 산지 하천으로 유역 상류부에는 21가구가 분포하고, 마을 중심으로 일부 논과 밭을 경작하고 가축을 사육하고 있다. 이러한 특성상 전반적으로 개발이 많이 이루어지지 않은 유역으로 앞으로도 자연 상태의 산지 하천의 특성을 유지할 것으로 판단된다 (Kim et al., 2008). 현재 CO<sub>2</sub> Flux 자료가 측정되고 있는 설마천 유역을 대상으로 CO<sub>2</sub>의 간접적인 지표로 Flux GPP를 구하고 동시에 MODIS GPP와 비교하고자 한다. 이는, 설마천 유역이 대부분은 산악지형으로 이루어져 있으며, 유역의 90% 이상은 주로 20-30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 혼효림에서의 CO<sub>2</sub> 평가가 적절하다고 판단되어 설마천

을 대상구역으로 선정하였다. 실질적으로 GPP 값을 비교하게 될 Flux 자료가 측정되는 설마천 유역의 중하류부 지점은 주변과 달리 지대가 높지 않은 평평한 지형을 이루고 있어 생태계 내 CO<sub>2</sub>의 유입과 호흡의 파악이 용이하다고 판단하였다.

## 2. Flux GPP의 산정

### 가. Eddy Covariance 방법

Eddy Covariance 방법은 생태계에서 난류 호흡의 원리로부터 얻어진다. 난류호흡은 공기가 회전하는 소용돌이의 수평흐름으로 볼 수 있다. 이러한 Eddy의 흐름은 무질서해 보이지만 Tower 관측을 통해 그 수평 및 연직 성분을 측정할 수 있다. 예를 들어, 3개의 CO<sub>2</sub> 분자가 올라가고 그 순간 2개의 CO<sub>2</sub> 분자가 내려왔다면 이 때의 순 Flux는 1개의 CO<sub>2</sub> 분자가 상향 이동하는 Flux가 된다. 이것이 바로 Eddy Covariance 관측의 일반적인 원리이다. 실제 Flux (F)는 연직 풍속과 혼합비의 편차의 공분산과 공기 밀도와의 곱을 평균한 값과 거의 일치한다. 본 연구에서 사용되는 CO<sub>2</sub> Flux 자료는 연직 풍속과 CO<sub>2</sub> 혼합비의 편차의 공분산을 평균한 값이 된다 (Hong et al., 2009).

본 연구에서는 KoFlux의 관측지중의 하나인 경기도 설마천의 20 m 타워에서 3차원 초음파 풍향·풍속계 (모델 RM-81000)와 적외선 기체 분석기 (모델 LI7000)를 사용하여 Eddy Covariance 방법으로 관측된 CO<sub>2</sub> 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. Lloyd and Taylor Method를 이용한 Rec 산정

GPP를 구하기 위해서는 생태계 호흡량 ( $R_{ec}$ )이 산정되어야 한다.  $R_{ec}$ 를 구하기 위해서 The Lloyd and Taylor 방법 (1994)을 이용하였으며 방법은 다음 식 (1)과 같다.

$$R_{ec} \text{ (mgCO}_2\text{/m}^2\text{s)} = R_{eco,ref} e^{E_0(1/(T_{ref}-T_0)-1/(T_k-T_0))} \quad (1)$$

$R_{eco,ref}$  (mgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>s)은 참조온도 (283.16 K)일 때 생태계 호흡량이고  $E_0$  활성화에너지이다.  $T_{ref}$ 는 참조온도로 283.16 K이고  $T_k$  (Kelvin)와  $T_0$  (Kelvin)는 각각 대기온도와 상수로 227.13 K이다. 본 연구에서 대기온도는 Flux 자료를 사용하여  $R_{ec}$ 을 산정하였다. 직접 측정하여 얻을 수 있는 매개변수  $E_0$ 와  $R_{eco,ref}$ 는 Wen et al. (2006)이 중국남동쪽 (26° 44' 52" N, 115° 03' 47" E, elevation 102 m)에서 직접 실험하여 얻어

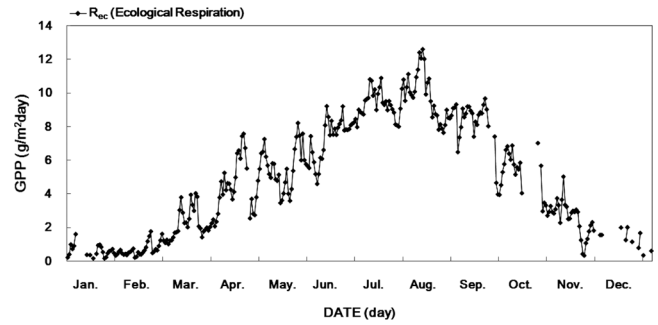


Fig. 3 The 2008 estimated ecological respiration from flux tower data

진  $E_0$ 는 309 K,  $R_{eco,ref}$ 는 0.077 mg/m<sup>2</sup>s를 사용하여 2008년 기간 동안에  $R_{ec}$ 를 산정하였다 (Fig. 3).

### 다. Net CO<sub>2</sub> 순환을 이용한 GPP 산정

CO<sub>2</sub> 순환은 크게 3분류로 나눌 수 있다. 식물이 광합성 작용을 하여 대기 중의 CO<sub>2</sub>를 흡수하고 산소를 생산하는 과정과 식물이 자신의 생체량을 유지하거나, 자가호흡형태로 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 과정 그리고 식물의 낙엽과 죽은 가지 등이 미생물에 의하여 썩으면서 CO<sub>2</sub>를 발생하는 과정, 즉 종속영양호흡 과정을 말한다. 이와 같이, 산림에서의 CO<sub>2</sub>순환에 의한 CO<sub>2</sub> 고정량을 GPP라고 할 수 있다. 본 연구에서는 생태계 순환호흡을 이용하여 GPP를 산정하고자 하였다.

CO<sub>2</sub> Flux 자료는 Flux Tower에 들어오는 CO<sub>2</sub>의 양을 측정하게 된다. 즉, 낮에는 식물의 광합성으로 인하여 CO<sub>2</sub>는 산림으로 유입이 되며 저녁에는 유출이 된다. 하루 중 낮에 산림으로 들어오는 CO<sub>2</sub> 양은 산림 위에서 측정되는 CO<sub>2</sub> Flux 자료와 산림에서의 호흡량의 합과 같다.

$$\text{Incoming CO}_2 = F_c + R_h \quad (2)$$

여기서,  $F_c$ 는 CO<sub>2</sub> Flux 자료,  $R_h$ 는 종속영양호흡을 나타낸다.  $F_c$ 의 양의부호는 CO<sub>2</sub>가 산림으로 들어오는 방향이며 음의부호는 산림 외부로 배출되는 방향을 나타낸다. 생태계 순환에 의해 산림에 들어오는 CO<sub>2</sub>는 순일차생산량 (Net Primary Production, NPP)과 저녁기간동안에 산림에 저류되는 CO<sub>2</sub>의 산술적인 합과 같다. 이는, 순생태계순환 (Net Ecosystem Exchange, NEE)과 같으며, NEE는 Flux Tower에서부터 산림으로 유입되는 CO<sub>2</sub> Flux 자료로 다음과 같이 표현된다.

$$NEE = F_c - R_{st} \quad (3)$$

$$GPP = NEE + R_{ec} \quad (4)$$

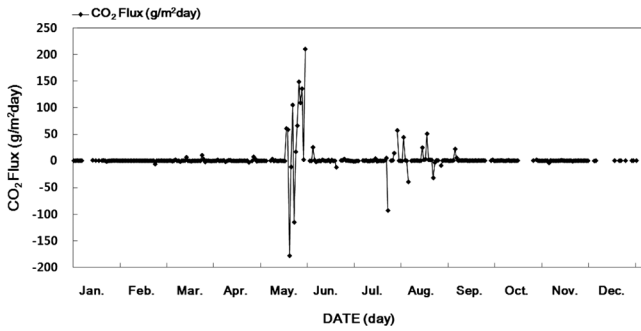


Fig. 4 The 2008 measured CO<sub>2</sub> Flux data

여기서,  $F_c$  ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ )는 산림위에서 30분 간격 측정된 CO<sub>2</sub> Flux 자료이고  $R_{ec}$  ( $\text{mol}/\text{m}^2\text{day}$ )는 생태계호흡량 (Ecosystem Respiration)이다. 따라서, GPP는 다음과 같다.

$$\text{GPP} (\text{mol}/\text{m}^2\text{day}) = F_c - R_{st} + R_{ec} \quad (5)$$

여기서,  $R_{st}$ 는 저녁에 생산되어 산림에 저류되는 CO<sub>2</sub>로써 저류 기간이 하루가 넘어갈 때 0이 된다 (Falk et al., 2008). 따라서,  $F_c$ 는 NEE와 같다고 볼 수 있다. 또한,  $R_{ec}$ 는 Nighttime data에 의해 결정되며 일반적으로  $R_{ec}$ 는 Daytime이 Nighttime 보다 약간 높지만 간편함을 위해 동일하다고 본다 (Nobuko et al., 2002). GPP는 Nighttime에 0값을 갖는다. CO<sub>2</sub> Flux는 설마천 유역에서 Flux 자료 ( $\text{mg}/\text{m}^2\text{s}$ )로 2008년 1년치를 보유하고 있다. 본 연구에서 사용한 CO<sub>2</sub> Flux 자료는 불규칙적인 값들로 인해 과다측정된 경향을 보이지만, 이는 6-8월간의 소수 자료 값으로 그 외에 값들은 적절하다고 판단된다 (Fig. 4).

### 3. MODIS data Product

MODIS GPP는 미항공우주국의 지구관측시스템인 Terra 인공위성에 탑재된 MODIS 센서로서, 미항공우주국은 1 km 공간해상도와 8일 단위 시간해상도의 MODIS GPP를 제공한다. 미항공우주국에서 제공하는 MODIS GPP 산출물은 8일간 누적 총일차생산성 (GPP), 8일간 누적 순광합성생산 (Net Photosynthetic Productivity, PSNnet), 연간 순일차생산성 (NPP)의 자료로 구성되어 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 (PAR, Photosynthetically Active

Radiation), 식물이 흡수한 PAR의 곱으로 이루어진다 (Kang et al., 2005). Fig. 1은 MODIS GPP 알고리즘을 나타냈다.

$$\text{GPP} = [\varepsilon] \times [\text{FPAR} \cdot \text{IPAR}] \quad (6)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_{\max} \cdot f(T_{\min}) \cdot f(\text{VPD})] \quad (7)$$

$$\text{IPAR} = [0.45 \times R_s] \quad (8)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 식물의 복사사용효율 (radiation use efficiency)이며,  $\varepsilon_{\max}$ 는 최대복사사용효율,  $T_{\min}$ 은 일최저기온, VPD는 포차,  $R_s$ 는 전천단파일사량이며, FPAR는 식물이 흡수한 PAR의 비율로서 0에서 1의 값을 갖는다. 즉, 식물이 흡수한 광합성유효 복사가 많을수록, 식물의 복사사용효율이 높을수록, 총일차생산성은 증가한다. 한편 MODIS GPP 알고리즘은 식물의 복사사용효율이 식생형에 따라서 결정되는  $\varepsilon_{\max}$ ,  $T_{\min}$ 과 VPD에 의해 조절된다고 가정한다 (식 7). 또한, IPAR는 일률적으로  $R_s$ 의 45%에 해당한다고 가정한다 (Heinsch et al., 2003).

본 연구에서는 2008년 기간 동안의 8일 주기 MODIS GPP 영상을 The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool을 이용하여 Korea TM으로 좌표변환을 거친 후, GIS 프로그램을 이용하여 설마천 유역에서의 GPP 값을 Import 하였다. 설마천 유역에서 Import된 GPP는 가로 세로 각각 1 km의 해상도의 pixel로 구성되어 설마천 유역을 총 8개의 pixel로 나뉘게 된다. 총 8개의 pixel의 각각의 GPP 값은 상이하므로 이중 Flux Tower가 위치한 5번 pixel의 GPP 값을 사용하여 측정 지점을 일치시켜 비교 분석 하였다 (Fig. 5). 일반적으로 GPP는 겨울철에 낮고 여름철에 높은 계절변화를 나타내야 하지만 MODIS GPP 영상은 위와 같은 계절 패턴을 나타내지 않는다. 2008년 MODIS data에 국한된 것이 아니라 2000년에서부터 2007년까지 과거자료에서도 마찬가지로 위에서의 계절 패턴은 나타나지 않고 있다 (Fig. 6). 이는 구름 혹은 눈 등이 존재하는 것으로 판별된 경우, MODIS GPP는 신뢰성이 없는 값을 보이게 되는데 이들 영상의 추정에 사용되는 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 운량에 대한 보정이 필요하다. Kang (2005)은 전후 시기의 자료를 이용해 내삽하거나 혹은 주변의 구름 없는 pixel 자료를 이용해 내삽하는 기법을 사용하여 구름에 의한 영향을 감쇄한 MODIS GPP를 산정하였다. 또한 우리나라를 대상으로 2001년에서 2003년간 MODIS FPAR, LAI, GPP 영

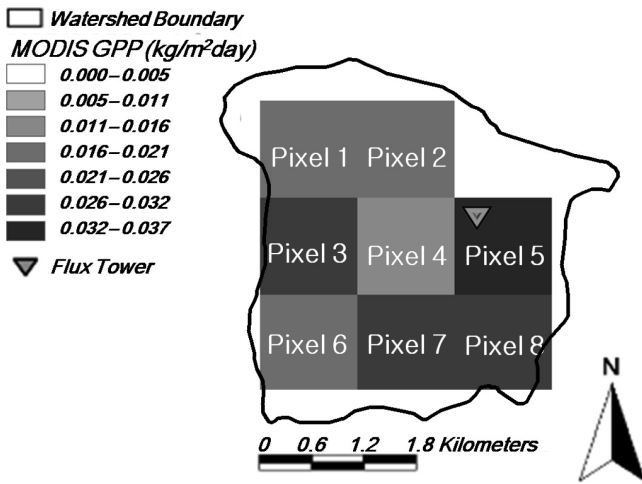


Fig. 5 8 pixels of the average MODIS GPP

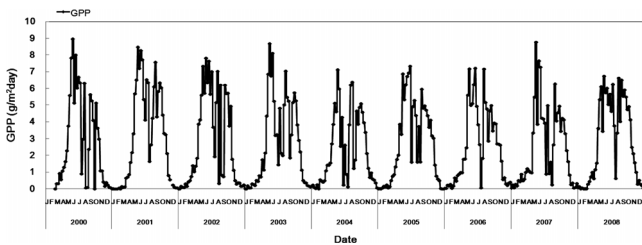


Fig. 6 Time series of day original MODIS GPP

상에 나타난 구름영향 오차를 감쇄하는 알고리즘을 수행함으로써 몬순 기후 지역에서의 구름 영향 오차를 평가하여 구름 영향 오차를 감쇄하였을 경우 평균적으로 GPP의 증가와 대부분의 오차는 6-9월간에 집중적으로 발생하였음을 밝혔다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. MODIS GPP 산정결과

2008년 8일 주기 MODIS GPP를 설마천 유역으로 추출하였으며 Flux Tower와 동일한 위치의 MODIS GPP 8 days 자료를 Flux GPP와 비교하기 위해서 설마천 유역을 GIS 프로그램을 이용하여 8개의 pixel로 구분하여 비교하였다. 그 결과, 설마천 전체 유역의 평균 MODIS GPP의 최소값은  $0.0094 \text{ g/m}^2/\text{day}$ , 최대값은  $6.61 \text{ g/m}^2/\text{day}$  이었다. 설마천 Flux Tower에 해당되는 5번 pixel에 MODIS GPP는 최소값  $0 \text{ g/m}^2/\text{day}$ , 최대값  $7.32 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 로 나타났다. 또한, 설마천 전체 유역의 평균 MODIS GPP의 1년간 총 생산량은  $1,026.3 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 이고 5번 pixel에 MODIS GPP 총 생산량은  $1,133.3 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 로 나타났다.

본 연구에서는 Kang (2005)이 제시한 내삼법을 사용하여 구

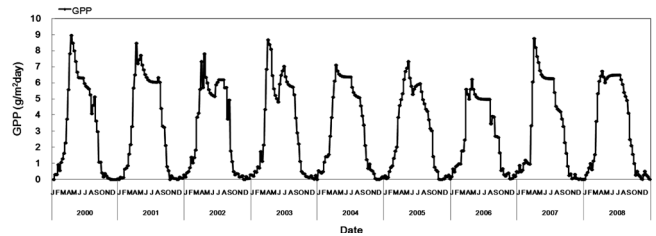


Fig. 7 Time series of day cloud-corrected MODIS GPP

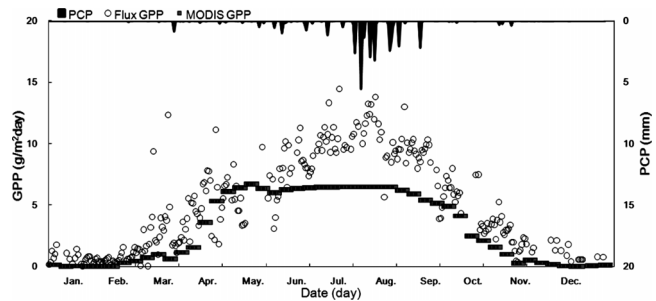


Fig. 8 The comparison between 2008 Flux tower GPP and MODIS GPP

름영향을 감쇄한 결과 보정 전 그래프보다 알맞은 계절패턴을 나타냈다 (Fig. 7). 그 결과 5번 pixel에 MODIS GPP 총 생산량은  $1,340.5 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 로 나타났다.

#### 2. Flux GPP 산정결과

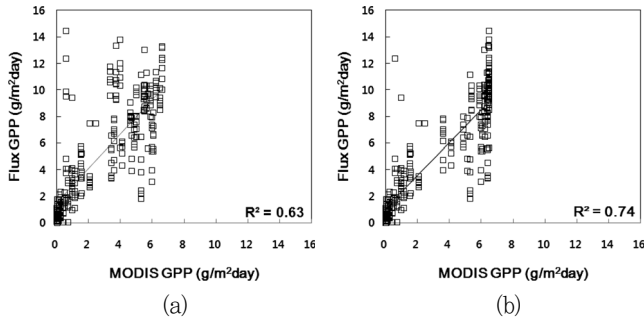
Flux GPP는 30분 간격  $\text{CO}_2$  Flux 자료를 일단위로 산출하여 Lloyd and Taylor 방법 (1994)을 이용하여 얻어진  $R_{ec}$ 와의 합으로 나타났다. 2008년 동안의  $\text{CO}_2$  Flux 자료는 5월에서 9월까지 상당히 불규칙적인 변화를 보여주고 있으며 최소값  $-200 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 에서 최대값  $200 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 로 나타나고 있다 (Fig. 4). 직접 관측된  $\text{CO}_2$  Flux 자료로부터 얻은 GPP는 최소값  $0.0065 \text{ g/m}^2/\text{day}$ , 최대값은  $14.47 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 을 나타냈으며, 2008년 동안 총 GPP 생산량은  $1,464.3 \text{ g/m}^2/\text{year}$ 로 나타났다 (Fig. 8). 그 결과, 보정후에도 전체적으로는 일치하지 않은 것으로 보이나 이는 운량이 심한 여름에 GPP값을 충분히 표현하지 못한 것으로 나타난다.

#### 3. MODIS GPP와 Flux GPP 결과 비교분석

MODIS GPP와 Flux GPP를 비교 분석한 결과 전체적으로 2월에서 7월까지 상승곡선을 나타내고 9월부터 12월까지는 하강 곡선을 나타냈다. 그러나 8월에는 MODIS GPP 값이 줄어들고 Flux GPP는 늘어나는 상이한 결과를 나타내고 있다. 2008년 전체 MODIS GPP에 1차 보정 전후의 산출결과

**Table 1 Comparison of the 2008 seasonal GPP between Flux tower and MODIS**

| Period | MODIS GPP (g/m <sup>2</sup> /day) | Flux tower GPP (g/m <sup>2</sup> /day) | R <sup>2</sup> |
|--------|-----------------------------------|--|----------------|
| Spring | 363.2                             | 309.3                                  | 0.59           |
| Summer | 633.4                             | 719.8                                  | 0.24           |
| Fall   | 331.3                             | 393.1                                  | 0.78           |
| Winter | 12.6                              | 42.0                                   | 0.14           |



**Fig. 9 Comparison of Flux tower and MODIS GPP (a) before and (b) after correction of cloud-originated errors**

를 비교하기 위하여 Fig. 9에 산포도를 제시하였다. (a)는 보정 전 MODIS GPP와 Flux GPP의 R<sup>2</sup> (determination of coefficient)이며 (b)는 1차 보정 후 MODIS GPP와 Flux GPP의 R<sup>2</sup>를 나타내어 두 자료의 상관성을 분석하였다. 그 결과, 구름 영향 감소전과 비교하여 MODIS GPP는 증가 하였고 R<sup>2</sup>도 높은 상관성을 나타냈다. 전체적으로 보정 후 R<sup>2</sup> 값은 높아지기는 했지만 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 최대값에서 많은 차이를 보인다. 이는 여름철 운량에 대한 보정이 충분히 이루어 지지 않은 것으로 판단된다.

계절별 GPP 동향을 분석하기 위해 각각 봄(3월-5월), 여름철(6월-8월), 가을(9월-11월), 겨울(12월-2월)로 나누어 비교 분석하였다 (Table 1). 전후 시기의 자료를 이용해 내삽하여 보정된 봄, 가을 GPP가 상관성이 가장 높았으며, 나머지 계절은 낮은 상관성을 보였다. 계절별로 보았을때 여름과 겨울에 MODIS GPP값은 실측값과 상관성이 낮아 신뢰성 있는 값으로 보기는 어렵다. 특히 몬순 기후의 영향으로 활발한 광합성 기간인 여름철에 운량이 증가하기 때문에 여름철에 MODIS 영상에 많은 오차를 미치게 된다. 강우일에는 운량이 증가하여 MODIS GPP 신뢰성이 떨어지므로 강우량과 관련하여 운량의 정도를 파악할 수 있다 (Fig. 8).

## V. 결 론

본 연구에서는 Flux 자료를 이용하여 산정된 GPP와 MODIS

GPP를 비교 분석하여 MODIS GPP의 신뢰성 및 활용성을 평가하고자 하였다. 설마천 유역을 대상으로 Flux Tower와 동일한 위치의 MODIS GPP 8 days 자료를 2008년 1월부터 12월 까지 구축하였으며 알맞은 투영법으로 전환 후 선형 내삽법을 이용하여 1차 보정을 하였다. 설마천 Flux Tower에서 Eddy Covariance 방법으로 관측된 Flux data는 CO<sub>2</sub> Flux와 Air Temperature로 2008년 1월부터 12월까지 일자료로 구축하였고 Air Temperature를 매개변수로 Lloyd and Taylor 방법으로부터 얻은 R<sub>ec</sub>를 사용하여 Flux GPP를 산정하였다.

본 연구에서는 궁극적으로 MODIS GPP의 알고리즘을 개선하기보다는 실측자료와 비교하여 MODIS GPP의 신뢰성 및 활용성을 평가하기 위해 각각의 추정된 값을 비교하였고 그 결과 MODIS GPP는 Flux GPP와 비교하여 과소평가되고 있음을 알 수 있다. 또한, 계절별 GPP 동향을 분석하기 위해 각각 봄 (3월-5월), 여름철 (6월-8월), 가을 (9월-11월), 겨울 (12월-2월)로 나누어 비교한 후 두 자료의 상관성을 분석한 결과 계절별 GPP 흐름 및 전체 GPP 흐름이 비교적 유사한 형태로 나타났다. 그렇지만 운량에 영향이 많이 끼치는 여름과 겨울에 MODIS GPP는 R<sup>2</sup> 값이 각각 0.24, 0.14로 실측치와의 많은 오차가 발생하게 된다. 이와 같은, MODIS GPP와 Flux GPP의 차이는 MODIS GPP 계산과정에서 기상요소의 오차가 복합적인 영향을 주었기 때문이다. 본 연구에서는 1차 보정후에도 여름철에 최고값 수준에서 안정화되는 합리적인 시계열적 패턴을 보이지 않았으며 1차 보정 전에 비해서 일관성 없는 변화를 다소 줄였지만 여전히 여름에 최고값에 도달한 후 서서히 감소하지 않고 일정한 수준에 정체되다 감소하는 경향을 보였다. 이는 몬순기후의 특성상 여름철에 집중되는 강우로 인한 구름의 영향을 완전히 제거하지 않았음을 나타내므로, 추가적인 감쇄를 위한 운량 알고리즘 개발이 필요 할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 MODIS GPP의 오차정도를 실측값과 비교하여 추가적인 알고리즘 개발이 필요하다는 결과를 얻어냈다. 또한, 구름영향이 외에도 GPP는 일사량 및 기온의 변화가 GPP 생산량에 영향을 미치기 때문에 구름에 대한 감쇄만으로는 정확한 GPP를 표현하기 어렵다고 판단된다. 따라서, 기온의 증가에 비례하여 GPP도 증가하는 패턴이 나타날 수 있도록 2차적인 보정이 이루어져야 한다. 결과적으로 MODIS GPP 자료는 운량에 따른 오차를 수반하므로 우리나라 기후 특성상 여름과 겨울에 해당하는 MODIS GPP는 신뢰성 없는 자료로 판단되지만 봄, 가을에서는 실측값과 비교하여 상당히 높은 상관성을 나타냈다. 따라서, 몬순기후 특성상 여름과 눈이 오는 날 운량이 많아지는 겨울에 추가적인 보정을 이루어짐으로써 신뢰성 있는 자료로 평가 될 수 있을 것이며 특정지역에 한하여 측정되는 Flux GPP 자료에 비해 MODIS GPP 자료는 광범위한 지역에 GPP를 측

정하여 자료를 구축할 수 있을 뿐만 아니라 많은 연구를 기초로 하여 무료로 제공되므로 실측과 시계열적 공간추정이 어려운 현실을 고려할 때, 각 분야에 보다 실용적이고 유용한 생태계 순환의 지표로 활용 될 수 있는 활용성이 큰 자료로 평가할 수 있다.

향후 연구로 MODIS GPP 영상에 정확한 신뢰성을 평가하기 위해서는 MODIS 영상에 대한 보정뿐만 아니라 정확한 Flux data를 이용하여 산정된 GPP와 비교분석이 이루어져야 한다. 그리하여 Flux data를 얻을 수 있는 연구지역을 선정하여 추가 연구를 진행함과 동시에, 구름에 대한 영향뿐만 아니라 온도와 일사량 등의 요소를 감안하여 MODIS GPP 오차를 감소하는 알고리즘 연구가 요구되어진다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. 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.
2. 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.umd.edu/ntsg/>.
3. 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).
4. 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).
5. 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.*
6. 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.
7. 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.
8. 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).
9. 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.
10. 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).
11. 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).
12. 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.
13. 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.
14. 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.*

15. 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.
16. 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.
17. Vogt, R., A. Christen, M. W. Rotach, and A. N. V. Satyanarayana, 2006. Temporal dynamics of CO<sub>2</sub> fluxes and profiles over a Central European city. *Theor. App. Climatol.* 84: 117-126.
18. 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 Forest Meteorology* 137: 166-175.
19. 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.