천리안 위성을 사용한 방출장파복사량 검증 : 청미천, 설마천

Assessment of Outgoing Longwave Radiation using COMS : Cheongmi and Sulma Catchments

백 종 진* / 서 찬 양** / 최 민 하***

Baek, Jong Jin / Sur, Chanyang / Choi, Minha

Abstract

The outgoing longwave radiation (R_{lu}) for estimation of evapotranspiration is essential to understand energy balance of earth. However, the ground measurement based R_{lu} has a limitation that the observation can just stand for the exact site, not for an area. In this study, remote sensing technique is adopted to compensate the limitation of ground observation using the geostationary satellite. We calculated R_{lu} using Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS). We validated R_{lu} from COMS with Cheongmicheon (CFK) and Sulmacheon (SMK) flux tower observations controlled by Hydrological Survey Center. The results showed that R_{lu} from COMS represented reasonable correlation with ground based measurement. Based on the results in this study, COMS will be able to be used for estimation of evapotranspiration.

Keywords : communication, ocean and meteorological satellite (COMS), MODIS, outgoing long-wave radiation, flux tower, energy balance

요 지

방출장파복사량은 수치예보모형, 수문모형, 증발산 등에 사용되는 인자로 지구의 에너지 균형을 이해하는데 필수적이다. 현재 국내외에서는 이를 정확하게 관측하기가 어려우며, 또한 공간적인 제약이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 원격탐사 기술을 적용함으로써 지상관측의 단점을 보완하기 위해 정지궤도 위성인 Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS)를 사용하여 방출장파복사량(Outgoing Longwave Radiation, R_{lu})를 계산하였다. 이 자료의 검증을 위해 유량조사사업단에서 운영·관리하는 청미천/설마천 Flux Tower의 자료를 사용하여 계산된 R_{lu} 와 MODIS 위성자료를 사용하여 계산된 R_{lu} 를 비교 및 검증하였다. 전반적으로 COMS의 자료가 높은 상관계수를 나타내어 COMS의 사용가능성을 보여주었다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 COMS를 이용한 증발산 산정 연구를 할 계획이다.

핵심용어 : 천리안 위성, MODIS, 방출장파복사량, Flux Tower, energy balance

* 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: jjbaek@hanyang.ac.kr)

Graduate Research Assistant, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

** 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (e-mail: cysur@hanyang.ac.kr)

Graduate Research Assistant, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

*** 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (e-mail: mchoi@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-0324)

Corresponding Author, Assistant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

1. 서론

최근에 들어 급격한 지구 온난화로 인한 수많은 재산 피해가 발생하고 있으며, 이에 여러 국가에서 대응 방안을 모색하고 있으나 그 정확한 원인을 파악하기에는 어려움이 있다. 현재까지 이로 인한 영향으로 오존층의 변화, 만년설의 해빙, 해수면의 상승, 생태계의 교란 등이 있으나, 이들 영향은 일부분의 예일 뿐이다(Jo and Kim, 1996). 이를 통해 자연현상의 변화에 대응하기 위해 다양한 분야에서 여러 연구(water resources, global climate, bio-geochemical cycles, hydrological cycles, ecosystem function, and biological diversity, etc.)가 이뤄지고 있다.

최근 수문기상학에서의 주된 연구주제로는 기후 변화의 원동력으로 예상되는 태양-지구, 대기-지표면간의 에너지 흐름 등 energy flux의 변화에 집중되고 있다. 이러한 energy flux의 흐름을 파악하기 위해서는 태양으로부터 유입되는 태양복사(solar radiation)에 대한 이해가 필요하다. 태양복사는 지구의 생태계 및 수문기상에서 에너지 순환에 중요한 역할을 하는 에너지원으로서 대규모의 기후예측 모형, 수문기상학적 모델링 및 기상모형 등의 기본 자료로 사용될 뿐만 아니라, 이 자료를 통해 지구내의 기상변화(구름, 안개, 강수량 및 지구 생태계 변화)에 중요한 인자로 사용된다(Oh, 1992). 하지만, 기존 국내에서 이들의 관측방법 및 전 지구적인 정량적인 관측을 통해 변화를 관찰하기에는 자료가 미비하여 총체적인 경향을 파악하기에는 부족하였다(Ho and Kang, 1998). 이러한 제한점들은 최근에 들어 다양한 과학 분야의 발달로 원격탐사 기법을 이용한 인공위성의 사용 및 대안 가능성이 제시되면서 해결할 수 있었다(Mu et al., 2007).

원격탐사는 지점별 관측을 하는 것이 아니라 Sensor의 관측되는 범위의 정보를 체계적으로 측정하기 때문에 위치, 고도, 깊이, 온도, 습도 등의 생·물리학적 자료에 대해 시간적, 공간적, 분광적 정보를 제공한다. 이런 인공위성을 이용한 연구들로 Oh (1992)은 NOAA의 극궤도 위성의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)과 High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS)을 이용한 방법과 EG 복사모형을 통한 방출장파복사량(Outgoing Longwave Radiation, R_{lu} or OLR) 결과의 비교·검증을 통해 방출장파복사량 추정기법의 개발의 중요성을 언급하였다. Jo and Kim (1996)는 방출장파복사량과 강수량간의 관계가 아시아의 몬순에 관련 되었을 것이라 판단하여 연구를 진행하였으며, 또한 다른 여러 인자 중

해수면 온도(Sea Surface Temperature, SST)의 영향으로 인한 계절적 변동성을 보인다고 시사하였다. Park (2010b)은 우리나라의 장마철 강수의 지속에 대한 영향을 미치는 요인에 대해서 파악하기 위해 해면기압, 상층의 등압면고도와 기온, 바람, 수증기 그리고 방출장파복사량 등의 비교·검증을 하였다. 이와 같이 선행연구들에서 지구로부터 방출되는 연구가 집중되고 있다. 연구가 집중되는 방출장파복사량의 중요성은 기상학적인 요인뿐만 아니라 수문학적 인자를 산출하는데 많은 영향을 미친다. 국외연구에서 가장 대표적으로 증발산을 추정하기 위한 방법 중 순복사량을 산정하는데 있어서 지구에서 방출되는 복사량을 산정하는데 중요한 역할을 하고 있다(Rivas and Caselles, 2004; Bisht et al., 2005; Allen et al., 2007; Hong et al., 2009; Bisht and Bras, 2010; Billesbach and Arkebauer, 2012). 국내에서도 방출장파복사량을 사용한 연구들이 부각되면서 여러 분야에서 연구가 이뤄지고 있다(Ha et al., 1997; Hong et al., 2005; Jeong et al., 2009; Jung and Kang, 2009). 이렇듯이, 지구에서 반사되는 지구 방출장파복사량은 강수량 및 집중호우 등을 예측하는 기후모델의 연구 및 수치해석을 통한 기후변동성 파악의 기본 자료로 활용되기 때문에 정량적인 산정이 필요하다. 선행 국내·외 연구들을 통해 MODIS 센서가 탑재된 극궤도위성을 이용한 방법이나 Landsat 위성을 이용한 방법 등에 대한 선행연구들을 통해 인공위성으로 산정된 인자들의 시공간적인 효율성이 뛰어나다는 것이 입증되었다. 그러나 극궤도위성들은 공간적으로 뛰어나지만 한반도 및 여러 국가를 하루에 한정된 횟수를 관측하기 때문에 시간적인 효율성인 측면에서 떨어지던 것이 사실이다. 그에 비해 정지궤도위성은 극궤도 위성과는 다르게 한 지역(국가)의 다양한 변화를 관찰할 수 있기 때문에 시·공간적으로 효율적이다.

본 연구에서는 국내의 기술력으로 만들어진 정지궤도 위성인 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)을 이용하였다. 국내·외에서는 많은 연구를 통해 검증된 극궤도 위성의 검증 및 비교가 이뤄졌으나, 2010년에 발사된 정지위성인 COMS 자료를 사용한 연구 및 검증이 부족한 실정이다. 그렇기 때문에 본 연구의 주요 목표는 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 센서를 탑재한 위성(Tarra), 지상 플렉스 타워와 COMS에서 산출되는 자료로 계산된 R_{lu} 의 산정을 통한 한반도에서의 방출장파복사량 비교 및 검증을 하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 MODERate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 영상 자료

본 연구에서 사용된 Terra의 MODIS 영상자료는 미 지질조사국과 미 항공우주국에서 제공하는 자료를 사용하였다. MODIS는 0.4~14.4 μm 의 파장영역을 가진 36개 밴드를 이용하여 매 1~2일마다 지구 전체표면을 관측하여 대기관측 및 해양과 육상 관측이 가능한 다목적 센서이다. 각각 Terra와 Aqua 인공위성에 탑재되어있으며, 매일 오전 10시 30분경(Descending), 오후 10시 30분경(Ascending)에 적도를 통과한다(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). 시공간적으로 각각 1일, 1×1 km의 안정적인 해상도 정보를 제공함으로써 대기, 해양, 육지에 대한 구름, 에어로졸, 수증기 등의 특성 분석, 대기권의 태양/지구 복사에너지 관측 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Lee et al., 2009; Jang, 2009; Sur and Choi, 2011).

2.2 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)

국내에서 2010년 이전까지는 미국의 기상위성들과 일본의 기상위성인 MTSAT-1R의 위성영상자료를 사용해 왔으나, 2010년 6월 27일에 순수 국내기술로 개발된 통신중계기 및 해양·기상센서가 탑재되어 발사되었다. 이로써 10번째 정지위성궤도 자체개발 국가로 등록되었다.

COMS는 MTSAT-2R에 설치된 것과 동일한 성능인 미국의 ITT사에서 주문된 기상센서 (Meteorological

Imager, MI)와 프랑스의 EADS Astrium과 공동제작한 해양관측 센서(Faure et al., 2008)인 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), 국산의 Ka 밴드 통신탑재체로 2개의 센서와 1개의 통신 중계기가 탑재되어있다. 각각 해양센서자료와 기상센서자료는 국가기상위성센터와 해양위성센터에서 효과적인 데이터 처리를 위해 GOCI Data Processing System (GDPS)과 COMS Data Processing System (CMPDS)에 실시간으로 처리된다(Baek and Choi, 2012). COMS의 기상센서는 평시에는 15분 간격으로 기상정보를 획득할 수 있으며, 비상시에는 최소 8분 간격으로 정보가 제공된다(Table 1). 자세한 설명은 Baek and Choi (2012)를 참고하기 바란다.

2.3 지상관측소 Flux Tower

오랜 기간 동안의 실측을 통해 기후 변화의 문제를 연구하기 위한 목표를 가지고 만들어진 전구 플럭스 관측망인 FLUXNET은 여러 분야의 연구자들에게 정보를 제공하고 있다. Fluxnet은 에디 공분산(eddy covariance)을 근간으로 지면-대기(Diffusion zone) 사이에 상호 교환되는 에너지 및 물질을 정량적으로 나타낼 수 있는 미기상학적 방법이 사용된다. 국내에서의 KoFlux는 일본, 중국과 더불어 아시아 대륙의 생태계 감시 네트워크인 AsiaFlux의 중요한 역할을 하고 있다(Hong et al., 2009). KoFlux는 한반도 생태계의 지속적인 감시(탄소/물/에너지 순환)를 통해 정량화하며, 순환 메커니즘과 영향력을 이해하고자함을 주요 목표로 하고 있다(Kwon and Kim, 2010). Flux Tower들의 자세한 내용들은 참고문헌들을 참고하기 바란다.

Table 1. Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS), Meteorological Imager (MI) Characteristics (<http://nmsc.kma.go.kr/>)

Meteorological Imager (MI)		
Channel	Center Wavelength (μm)	Wavelength range (μm)
Visible (VIS)	0.675 μm	0.55 ~ 0.8 μm
Shortwave infrared (SWIR)	3.75 μm	3.5 ~ 4.0 μm
Water vapor (WV)	6.75 μm	6.5 ~ 7.0 μm
Infrared 1 (IR 1)	10.8 μm	10.3 ~ 11.3 μm
Infrared 2 (IR 2)	12.0 μm	11.5 ~ 12.5 μm
Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS) Characteristics		
Mass (ton)	2.5	
Operationa (years)l	7	
Altitude (km)	36.000	
Time interval (min)	15 min (Emergency 8 min)	
Location	128.2 (degree) East longitude	

본 연구에서 유량조사사업단의 Flux Tower가 설치된 설마천 유역과 청미천 유역을 연구지역으로 선정하였다 (Fig. 1). 경기도 파주시 적성면 두지리 지점에 위치한 설마천은 임진강의 제 1지류인 지방 2급 하천으로 유역연장 10.77 km, 유역면적 18.56 km²이다. 설마천의 시험 유역은 면적 8.48 km², 유로연장 5.59 km인 산악형 하천이다. 설마천의 산림과 토양은 활엽수림과 혼효림이 대부분을 차지하고 있는 혼합림이며, 토양은 대표적으로 사양토(sandy loam)로 구성되어있다. 청미천은 경기도 여주시 점동에 위치하며, 국가 지방 2급 하천으로 유역은 유역면적 569.6 km², 유역연장 60.8 km이다. 청미천 유역에 설치된 Flux Tower는 논농지에 위치해 있으며, 토양 특성은 Sandy loam과 loam으로 구성되어있다(Table 2). 두 연구지역의 플릭스 자료는 자연현상(낙뢰)과 외부요인(강우, 기기고장) 및 기기교체로 인해 청미천(5월 1일~9일, 5월 16일~26일, 7월 16일~20일, 7월 25일~30일)과 설마천(4월 30일~5월 9일, 5월 16일~26일, 7월 16일~20일, 7월 25일~7월 30일)에서 결측치가 발생하였다. 본 연구에서는 결측치가 발생한 부분에 대해서는 비교 및 검증에서 제외하였다.

Fig. 1. Study Area Locations

Table 2. Flux Sites Informations

Site	Latitude	Longitude	Terrain Type	Soil Type	Elevation (m)	Annual temperature (°C) & precipitation (mm)
SMK	37° 56' 19.99" N	126° 57' 16.94" E	Mixed Forest	Sandy loam	293 m	11.5 °C 1,332 mm
CFK	37° 09' 35" N	127° 39' 10" E	rice paddy	Silty loam to loam	141 m	11.5 °C 1,107 mm

3. 표면도달일사량 산출 알고리즘

3.1 MODIS 자료와 COMS 지표면 온도를 이용한 방출 장파 복사량 산정

수문기상학에서의 에너지 수지 방법은 물수지 방법보다 물리적인 요인이 적용되어 산정된다. 이러한 물리적인 에너지 수지 방법에서 방출장파복사량은 중요한 부분 중 하나이다. 방출 장파복사량은 지구에서 우주로 방출되는 단위면적당 장파복사량(Wm⁻²)으로 에너지 균형, 수지에 보모형, 수문모형 등에 사용되어 신뢰할 수 있는 자료이다. 이러한 방출장파복사량은 열역학적 이론에 근거하여서 이상적인 복사체(black body)는 절대 온도의 4 제곱에 비례한다는 이론에 의해 Stefan-Boltzmann law을 적용하여 산정된다(Bisht et al., 2005).

$$R_{lu} = \sigma \epsilon_s T_s^4 \quad (1)$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W M}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_s 는 지표면 온도(K), ϵ_s 는 광대역 지표 방사율(Broad-band surface emissivity)로 0.97의 값을 가지는 계수를 적용하였다(Oh, 1992). 본 연구에서는 MODIS 자료 중 MODIS 11 Land Product (MODIS11A1 Daily LST)에서 추출하여 사용하였다(Wan, 2007). 이 자료는 1일 1개의 자료가 제공되며, 이 자료는 1일의 평균값으로 볼 수 있으며, Sinusoidal projection으로 1×1 km의 공간해상도로서 투영된다. 또한, COMS의 지표면온도 자료를 이용하여 산정된 방출 장파복사량은 Baek and Choi (2012)에서 지표면 온도 사용가능성을 판별 하였기에 이 자료를 이용하여 계산하였다.

인공위성 자료는 투영체계 요인들의 영향으로 기하학적인 형태의 자료를 가지게 된다. 그중 가장 큰 문제는 지구의 곡률로 인해 생기는 오차와 좌표 투영체계의 차이로 생기게 된다. 이에 COMS와 MODIS의 두 자료를 비교하기 위해서는 동일한 좌표 체계로 설정 할 필요가 있다. 연구목적에 적합하도록 MODIS의 Sinusoidal (SIN) projection을 Transverse Mercator (TM) projection으로 변환하였다(Rochdi and Fernandes, 2008; Hong et al., 2009;

Park, 2010a; Sur and Choi, 2011; Kim et al., 2011; Baek and Choi, 2012).

3.2 오차 분석

Fig. 2에 보이듯이 다음과 같은 연구 수서로 본 연구를 실시하였다. 본 연구에서 Table 3과 같은 통계분석들(RMSE, MAE, Bias, Correlation Coefficient, MAE, MAPE, IOA)을 통해서 자료 간의 정확성을 비교했으며, 검증이 부족한 COMS 자료의 한반도 적용성을 뒷받침할 것이다. Table 3에서 M 은 모형의 값, O 은 관측값, $\bar{M}$, $\bar{O}$ 은 자료의 평균, N , n 은 자료의 개수이다. 범위 -1에서 1의 값을 가지는 상관계수(Correlation Coefficient)는 모형값과 관측값 사이의 상관성을 나타내며, 상관계수가 “0”은 두 자료간의 아무런 관계가 없음을 의미한다.

Scatter plot은 자료 간의 일치성을 기준으로 자료가 얼마

Fig. 2. Research Flow Chart

Table 3. Statistical Methods for Error Evaluation

Item	Equation
Correlation Coefficient	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)}}$
Bias (mean error)	$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)}{N}$
RMSE (Root Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{N}}$
MAPE (Mean Absolute Percentage Error)	$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left \frac{O_i - M_i}{O_i} \right $
MAE (Mean Absolute Error)	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - O_i }{N}$
IOA (Index Of Agreement)	$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M} + M_i - \bar{O})^2}$

나 분산되어 있는가를 나타낸다. Bias는 모형 값과 관측값 간 자료의 일치하는 정도를 정량화 할 수 있다. 양의 Bias는 model값이 과대 추정되는 것을 의미하며, 음의 bias는 과소 추정되는 것을 의미한다. IOA (Index of Agreement)는 항상 1보다 작으며 1에 가까울수록 Model (Satellite data) 결과와 관측치 간에 일치하다고 할 수 있고, 반면 값이 “0”에 근접할수록 model과 관측치가 불일치함을 나타낸다(Mäkelä and Pekkarinen, 2004; Heiskanen and Kivinen, 2008; Heiskanen et al., 2011; Baek and Choi, 2012).

4. 결과 및 고찰

4.1 두 위성자료의 방출장파복사량(R_{lu}) 비교

본 연구는 2011년 4월 1일부터 8월 31일을 기준으로 MODIS 자료로 산정한 R_{lu} 와 Eq. (1)을 사용하여 계산된 COMS의 R_{lu} 를 산정 하였다. 두 인공위성자료의 상관성을 비교하기 위해 청미천과 설마천의 Flux Tower 지점(좌표)을 기준으로 일평균 시계열로 나타내어 시간에 따른 변동성을 파악하였다. MODIS R_{lu} 는 1일 1개로 산출되기 때문에 이를 하루의 평균값이라고 할 수 있으며, 이와 비교하기 위해서는 COMS 자료(15분 간격)를 일평균 하여 시간에 따른 변동성을 확인하였다. Fig. 3에서 보이듯이 4월에서 5월까지 사이에서 대체적으로 MODIS R_{lu} 값이 COMS R_{lu} 값보다 크게(10~60 W/m²) 산정되었다. 반면, 6월에서 8월까지 사이에서 대체적으로 COMS R_{lu} 값이 MODIS R_{lu} 값보다 작게(10~50 W/m²) 산정되는 것을 확인할 수 있었으며, 전반적으로 두 위성의 R_{lu} 값이 비슷한 경향을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4에서 보듯이 두 자료간의 정확도 분석으로 청미천 지점이 0.83, 설마천 지점이 0.79의 상관계수 값을 나타내었다. 이는 두 인공위성자료 간에서 각각 다른 연구지역에서의 상관성을 비교해 볼 때 두 자료간의 연관성이 있음을 나타낸다고 할 수 있다. Table 5에 두 인공위성 자료의 비교·검증을 위한 기본 통계분석을 실시하였다. Bias와 Root Mean Square Error (RMSE)는 청미천 지점을 기준으로 -13.87 W/m², 33.48 W/m², 설마천 지점을 기준으로 -6.11 W/m², 25.74 W/m²이다. 그 밖에 Mean Absolute Error (MAE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), Index Of Agreement (IOA)들의 통계분석은 청미천이 28.41 W/m², 6.67%, 0.89, 설마천이 21.70 W/m², 5.33%, 0.90으로 분석되었다. 이는 두 자료간의 연관성이 밀접하다고 할 수 있고, 두 인공위성으로 산정된 자료들이 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동일한 연구

(a) CFK site

(b) SMK site

Fig. 3. Comparison of Estimated MODIS Daily R_{lu} and Estimated COMS Daily R_{lu} at the CFK(a), and SMK(b)

(a) CFK MODIS R_{lu} VS. COMS R_{lu}

(b) SMK MODIS R_{lu} VS. COMS R_{lu}

Fig. 4. Comparison of the Difference between Estimated MODIS Daily R_{lu} and Estimated COMS Daily R_{lu} at the CFK(a), and SMK(b)

기간 동안에 MODIS의 자료보다 COMS의 자료가 더 높은 획득률을 가진다는 면에서 앞서 언급한 것과 같이 시·공간적으로 기존의 극궤도 위성보다 정지궤도위성이 뛰어나다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 청미천/설마천 Flux tower의 R_{lu} 와 COMS의 R_{lu} 비교

본 연구에서는 2011년의 청미천과 설마천 유역 Flux

Tower의 2011년 4월 1일부터 8월 31일까지 자료를 사용하였다. 기존의 극궤도 위성자료는 1일 개의 자료가 생성되는 것을 감안할 때, COMS의 자료가 15분마다(1일 96개) 관측되기 때문에 시공간적인 변화양상을 확인하기가 유용하다.

방출장파복사량은 Eq. (1)을 통해 두 연구지역 Flux Tower R_{lu} 와 COMS R_{lu} 의 비교·검증을 실시하였다. 두 자료의 시간간격으로는 COMS가 15분 간격, Flux Tower는 30분 간격으로 관측된다. 따라서 관측 지점(Flux Tower) 자료와 인공위성(COMS) 자료의 비교 및 검증을 위해서 30분 간격의 자료로 정렬함으로써 COMS의 정확성 및 활용성을 확인하고자 하였다.

청미천과 설마천의 시계열 그래프는 Fig. 5(a), (b)와 같다. 각각 그래프에서 Flux Tower에서 계산된 R_{lu} (실선)는 COMS에서 계산된 R_{lu} 보다 작게 나타나는 것을 확인

할 수 있다. 이는 인공위성을 사용한 선행연구를 통해서 알려져 있듯이 인공위성을 통해 산정되는 자료는 실측자료에 비해 과대 산정된다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)는 청미천 Flux Tower와 COMS, (b)는 설마천 Flux Tower와 COMS 자료간의 정확도 분석을 위해 Scatter Plot으로 나타내었다. 두 지역의 상관계수는 청미천이 0.851, 설마천이 0.807로 R_{lu} 의 값이 1:1 선에 근접해 있는 것을 확인할 수 있어 자료간의 연관성이 높다고 판단된다. Table 5에서 보듯이 통계학적 분석을 통해 청미천 유역에는 평균적으로 4.05 W/m^2 높게 산정되고, 설마천 유역에는 평균적으로 0.13 W/m^2 정도로 높게 산정되었다. 두 지역의 표본 오차(RMSE, MAE)는 청미천 유역이 35.83 W/m^2 , 28.19 W/m^2 , 설마천 유역이 36.68 W/m^2 , 30.33 W/m^2 의 오차를 나타내고 있으며, Flux Tower와 COMS간의 일치도를 나타내는 IOA는 청미천이 0.93, 설마천이 0.82로 높은 정확

Table 4. Comparison between MODIS Modeled R_{lu} and COMS Modeled R_{lu} at the CFK and SMK

Site	Bias (W/m^2)	RMSE (W/m^2)	MAE (W/m^2)	MAPE (%)	IOA	a	b	R
CFK	-13.87	33.48	28.41	6.67	0.89	1.50	-222.28	0.83
SMK	-6.11	25.74	21.70	5.33	0.90	1.04	-22.42	0.79

(a) CFK site

(b) SMK site

Fig. 5. Comparison of Flux Tower Measurements and Estimated COMS R_{lu} at the CFK(a), and SMK(b)

Fig. 6. Comparison of the Difference between Measured and COMS R_{lu} at the CFK(a), and SMK(b)

Table 5. Comparison between MODIS Modeled R_{lu} and COMS Modeled R_{lu} at the CFK and SMK

site	Bias (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MAPE (%)	IOA	a	b	R
CFK	4.05	35.83	28.19	0.07	0.93	1.19	-73.39	0.85
SMK	0.13	36.68	30.33	0.08	0.82	1.16	-63.34	0.81

Fig. 7. Time Series of Estimated Daily Average R_{lu} at the CFK(a), and SMK(b)

도를 나타내고 있다. Fig. 7의 시계열 그래프를 보듯이 실질적으로 낙뢰로 인한 결측치의 발생이 아닌 돌발성 집중 호수로 인해 Flux Tower 관측이 미흡한 기간과 COMS 자료가 산출되지 않는 기간이 비슷한 경향을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 Flux Tower의 관측 기기들이 강우로 인한 오작동으로 인해 결측이 나타날 수 있고, 원격탐사 기법을 활용한 COMS 센서가 비구름 층과 외부적인 요인 등으로 인해서 결측치가 발생하였다.

4.3 세 자료(Flux Tower, COMS, MODIS) R_{lu} 의 비교

세 자료의 비교하기 위해 일평균 R_{lu} 값으로 변환하여 비교·검증을 실시하였다. Fig. 8은 청미천/설마천 지점의 일평균 R_{lu} 의 시간적 변화를 보여준다. 관측기간 동안 두 지점 R_{lu} 의 계절적 평균 강도는 봄철에는 Flux Tower가 평균 약 340 W/m^2 , COMS가 평균 약 320 W/m^2 , MODIS가 평균 약 400 W/m^2 이고, 여름철에는 세 자료 모두 평균

약 $430 \sim 450 \text{ W/m}^2$ 를 나타내고 있어 계절별로 다르다. 청미천/설마천의 2011년 시계열 그래프 Fig. 8(a), (b)의 경우 MODIS에 비해 COMS와 Flux Tower R_{lu} 값의 경향성이 비슷하며, COMS R_{lu} 값의 변동 폭이 Flux Tower의 R_{lu} 값보다 변동성이 더 큰 것을 알 수 있다. 이들 자료를 Flux Tower의 자료와 비교하였을 때, 가장 좋은 상관계수를 보인 것은 청미천 Flux Tower R_{lu} 와 COMS R_{lu} 자료 간의 상관관계로 0.89를 보였다. 뿐만 아니라, 청미천 Flux Tower R_{lu} 와 MODIS R_{lu} 는 0.78이고, 설마천 Flux Tower R_{lu} 와 COMS R_{lu} 는 0.76, 설마천 Flux Tower R_{lu} 와 MODIS R_{lu} 는 0.84이다. Fig. 8에서 보이듯이 전반적으로 높은 상관계수를 보였으나, Flux Tower와 MODIS 간에 비교한 (b)와 (d)는 자료간의 뚜렷한 선형성을 나타내고 있지 않다. 그에 비해 두 지점에서 Flux tower와 COMS 간에 비교한 (a)와 (c)의 scatter plot에서 알 수 있듯이 추세선의 y 절편의 값이 0에 가까운 결과 값을 가지며, 기울기 값 또한 1에 상당히 근접한 것으로 보아 두 지점에서의 Flux Tower와

Fig. 8. Comparison of the Difference between Measured and Estimated Daily R_{lu} for (a) Flux R_{lu} VS. COMS R_{lu} (b) Flux R_{lu} VS. MODIS R_{lu} (c) Flux R_{lu} VS. COMS R_{lu} and (d) Flux R_{lu} VS. MODIS R_{lu}

Table 6. Statistics of Comparisons between Measured and Estimated Daily R_{lu}

Site	Case	Bias (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MAPE (%)	IOA	a	b	R
CFK	Flux VS. COMS	-1.71	23.19	17.96	4.33	0.95	1.04	-17.95	0.89
	Flux VS. MODIS	27.13	37.44	31.95	8.32	0.59	0.53	218.28	0.78
SMK	Flux VS. COMS	-12.14	32.24	24.45	5.84	0.88	0.88	38.29	0.76
	Flux VS. MODIS	13.03	24.16	20.71	5.28	0.85	0.68	140.51	0.84

COMS 간의 선형성이 비교적 뚜렷하게 나타난다고 할 수 있다. 자료간의 산점도만으로 두 자료간의 연관성을 나타내기에는 한계가 있기 때문에 Table 6에 세 자료간의 통계학적인 결과를 나타내었다. 표에서 확인할 수 있듯이 Flux Tower와 COMS간의 비교만을 보면 청미천에서의 Bias가 -1.71 W/m², 설마천에서의 Bias가 -12.14 W/m² 만큼 적게 산정되는 것은 평균적으로 COMS R_{lu} 가 과소 산정된다는 것을 의미한다. 그밖에 RMSE, MAE는 청미천 지점은 23.19 W/m², 17.96 W/m²이고, 설마천 지점은 32.24 W/m², 24.45 W/m²으로 전반적인 R_{lu} 범위를 고려해볼 경우 오차가 작다는 것을 알 수 있으며, 자료들의 정확성을 판단되는 MAPE의 결과는 두 자료에서 4.33%, 5.84%로 나타나 상당히 유의한 것으로 평가된다. 또한, 두 자료의 일치도를 나타내는 IOA가 1에 가까운 것으로 나타나며 따라 산정 결과가 만족스럽다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 청미천/설마천 지역의 Flux Tower에서 산출된 R_{lu} 와 인공위성 자료에서 산출된 R_{lu} 에 대한 비교 및 검증 실시하였다. 첫 번째로, MODIS 자료로 계산된 R_{lu} 와 COMS 자료로 계산된 R_{lu} 간의 비교·검증을 실시하였다. MODIS 자료와의 비교하기 위해 COMS 자료를 일평균 하였으며, 이를 청미천/설마천 지점을 기준으로 비교한 결과 선행연구를 통해 많은 신빙성을 얻은 MODIS 위성과 COMS 위성의 연관성이 좋은 것으로 나타났다. 두 번째로, 30분 간격으로 관측되는 Flux Tower의 자료를 기준으로 COMS와 비교·검증을 실시하였다. Fig. 6과 같이 scatter plot에서의 분포가 1:1 라인에 상당히 근접하고, 일치도와 상관관계수가 높은 것으로 나타났다. Kim, et al. (2003)에서 언급한 것처럼 일평균 R_{lu} 의 값이 봄에서 여름으로 증가하는 경향을 보이다가 장마철이 시작되는 8월 중순경부터는 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 각 계절별로 평균값 이하의 R_{lu} 값은 외부적인 요인으로

로 발생하며, 특히 변동성이 심한 계절이 여름철로 구름과 장마 등으로 인한 빈도가 높기 때문이다. 마지막으로 세 자료(Flux Tower, COMS, MODIS)를 일평균 자료로 변환하여 비교·검증을 하였다. 전반적으로 Flux Tower와 비교되는 COMS 자료의 수(관측된 날짜)가 MODIS 자료의 수보다 비교되는 자료의 수가 많기 때문에 정확도를 판단하는데 더 적합하다고 할 수 있다. 이는 기존의 MODIS로 연구되어 왔던 부분 보다 자료의 수득률이 높다는 것을 의미한다. 또한 기존에 인공위성이 과대 산정되는 것으로 알려져 있으나 정지위성(COMS)을 통해 산정된 R_{lu} 의 Bias가 Flux Tower보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 COMS의 자료가 Flux Tower의 자료에 비해 상대적으로 하루 동안 산정되는 R_{lu} 의 편차가 크기 때문에 일평균 자료로 변환하였을 때에 COMS 위성자료의 값이 Flux Tower의 일평균 값보다 작아질 수 있기 때문이다. 위의 결과를 종합해보면 지점 자료를 참 값이라고 하였을 때, COMS는 15분 간격으로 지표면 온도가 산출됨에 따라 자료의 양적인 면에서도 기존 MODIS보다 효율성이 뛰어나다고 할 수 있으며, COMS R_{lu} 가 높은 상관성을 보임에 따라 이를 이용한 R_{lu} 산정의 가능성을 보여주었다.

본 연구를 통해서 추후 연구에는 다음과 같은 부분도 고려해야 할 것으로 보인다. 첫 번째로는 플렉스 타워의 설치 지점의 균질한 식생 상태와 잘 발달된 난류장 및 정상성을 만족할 경우에 양질의 자료를 얻을 수 있으나, 실질적으로 이러한 조건을 만족하는 경우는 드물기 때문에 발생하는 관측지점에서의 오차가 포함될 수 있다(Kwon et al., 2007). 두 번째로는 R_{lu} 는 지표면 온도(Land Surface Temperature)의 영향이 크기 때문에 지표면 온도의 차이로 인해 R_{lu} 의 편차가 크게 발생되었다고 판단된다. Baek and Choi (2012)에서 나타낸 바와 같이 COMS 공간해상도의 영향으로 인해 지표면 온도는 한 픽셀(4×4km)의 평균값으로 산정되게 된다. 하지만 4km 픽셀에 포함되는 식생, 지형, 바람, 구름 등의 외부적인 영향으로 인해 한 지점 자료와의 비교에서 차이가 발생할 수 있으며, 또한 앞서

언급했던 것과 같이 실질적으로 관측되는 자료와 인공위성 자료를 통한 알고리즘으로 산정되는 자료 간의 차이로 인해 발생하였다고 판단된다. 하지만 원격탐사는 Sensor에 의해 단순히 어떤 값으로 제공되기 때문에 사용자는 자료의 적절한 처리방법을 결정해야하며, 원격탐사에서 얻어지는 정보는 지상에서 관측해야하는 비용을 생각하면 감수할 정도의 비용으로 그 만큼의 가치를 가지고 있다. 그렇기 때문에 본 연구를 초석 삼아 추후 연구를 통해 보안 및 개선 방법을 통해 보다 정확한 산정에 도움이 되었으면 한다.

감사의 글

본 연구는 안전행정부 국립재난안전연구원의 지원("원격탐사기반 선진형 홍수관리 및 가뭄대응 기반기술 구축", "NDMI-주요-2013-09-02")에 의해 수행되었습니다. 천리안 위성자료를 제공해 주신 국가기상위성센터 관계자분들께 감사를 전합니다.

REFERENCES

- Allen, R.G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007). "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model." *Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 380-394.
- Baek, J.J., and Choi, M.H. (2012). "Availability of Land Surface Temperature from the COMS in the Korea Peninsula." *Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 8, pp. 755-765.
- Billesbach, D.P., and Arkebauer, T.J. (2012). "First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 156, pp. 104-110.
- Bisht, G., and Bras, R.L. (2010). "Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 7, pp. 1522-1534.
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., and Jiang, L. (2005). "Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 1, pp. 52-67.
- Faure, F., Coste, P., and Kang, G. (2008). "The GOCI instrument on COMS mission-The first geostationary ocean color imager." *Proceedings of 7th International Conference on Space Optics*, 2008.
- Ha, K.J., Moon, J.Y., Kim, J.W., Chung, I.U., Oh, J.H., and Um, H.H. (1997). "The Characteristics of the Intraseasonal and Interannual Variations of OLR and Precipitation Simulated by YONU GCM Tr.7." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 33, No. 1, pp. 1-15.
- Heiskanen, J., and Kivinen, S. (2008). "Assessment of multispectral, -temporal and -angular MODIS data for tree cover mapping in the tundra-taiga transition zone." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, No. 5, pp. 2367-2380.
- Heiskanen, J., Rautiainen, M., Korhonen, L., Möttö, M., and Stenberg, P. (2011). "Retrieval of boreal forest LAI using a forest reflectance model and empirical regressions." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 13, No. 4, pp. 595-606.
- Ho, C.H., and Kang, I.S. (1998). "Changes in the Earth-Atmosphere Heat Budgets Due to A Doubling CO₂." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 34, No. 4, pp. 670-676.
- Hong, K.O., Suh, M.S., and Kang, J.H. (2009). "Improvement of COMS Land Surface Temperature Retrieval Algorithm." *The Korean Society of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 6, pp. 507-515.
- Hong, G.M., Kwon, B.H., and Kim, Y.S. (2005). "Heat Fluxes in the Marine Atmospheric Surface Layer around the Korean Peninsula based on Satellite Data." *The Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 17, No. 2, pp. 209-217.
- Hong, J.K., Kwon, H.J., Lim, J.H., Byun, Y.H., Lee, J.H., and Kim, J. (2009). "Standardization of KoFlux Eddy-Covariance Data Processing." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-26.
- Jang, K.C. (2009). "Mapping evapotranspiration using MODIS Products and MM5 data" Master's Thesis, Kangwon National University, Korea.
- Jeong, S.T., Jang, K.C., Kang, S.K., Kim, J., Hiroaki K., Minoru, G., Asanuma, J., Saigusa, N., Wang, S., and Han, S.J. (2009). "Evaluation of MODIS-derived

- Evapotranspiration at the Flux Tower Sites in East Asia.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 174-184.
- Jo, M.S., and Kim, J.W. (1996). “GCM Simulation of Precipitation and OLR in Relation to the Asian Monsoon.” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 32, No. 3, pp. 435-454.
- Jung, D.I., and Kang, J.W. (2009). “An Analysis of Changes in Pan Evaporation and Climate Values Related to Actual Evaporation.” *Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 2, pp. 117-129.
- Kim, G.H., Lee, L.S., Jung, J.H., and Won, S.Y. (2011). “A Comparative Analysis of Field Surveying Vegetation Data and NDVI from KOMPSAT-2 Satellite Imagery.” *Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 4, pp. 405-411.
- Kim, Y.H., Cho, K.S., Kim, H.T., Um, H.H., and Choi, B.C. (2003). “Characteristics of the Seasonal Variation of the Radiation in a Mixed Forest at Kwangneung Arboretum” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 19, No. 3, pp. 285-295.
- Kwon, H.J., and Kim, J. (2010). “KoFlux’s Progress : Background, Status and Direction.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 4, pp. 241-263.
- Kwon, H.J., Lee, J.H., Lee, Y.K., Lee, J.W., Jung, S.W., and Kim, J. (2007). “Seasonal Variations of Evapotranspiration Observed in a Mixed forest in the Seolmacheon Catchment.” *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 39-47.
- Lee, S.H., Ahn, J.S., Kim, H.D., and Hwang, S.J. (2009). “Comparison Study on the Estimation Algorithm of Land Surface Temperature for MODIS Data at the Korean Peninsula.” *The Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 355-367.
- Mäkelä, H., and Pekkarinen, A. (2004). “Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data.” *Forest Ecology and Management*, Vol. 196, No. 2, pp. 245-255.
- Mu, Q., Heinsch, F.A. Zhao, M., and Running, S.W. (2007). “Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, pp. 519-536.
- Oh, S.N. (1992). “Estimation of the Earth Outgoing Longwave Radiation using a Infrared Radiation Transfer Model and Satellite Radiance Observation.” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 28, No. 4, pp. 465-478.
- Park, B.I. (2010b). “Difference of Synoptic Characteristics according to the Persistence of Rainfall in Korea during the Changma Season.” *The Korean Geographical Society*, Vol. 45, No. 6, pp. 748-765.
- Park, N.W. (2010a). “Downscaling of Thematic Maps Based on Remote Sensing Data using Multi-Scale Geostatistics.” *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 1, pp. 29-38.
- Rivas, R., and Caselles, V. (2004). “A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 93, No. 1, pp. 68-76.
- Rochdi, N., and Fernandes, R. (2008). “Intercalibration of Vegetation Indices from Landsat ETM+ and MODIS 500 Data for LAI Mapping.” *Geomatics Canada*.
- Sur, C.Y., and Choi, M.H. (2011). “An intercomparison of two satellite data-based evapotranspiration approaches.” *Korean Wetlands Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 35-39.
- Wan, Z. (2007). “Collection-5 MODIS Land Surface Temperature Products Users’ Guide.” *Santa Barbara: ICESS, University of California*, Vol. 30, pp. 5-10.

논문번호: 12-118	접수: 2012.11.01
수정일자: 2013.01.14/01.31	심사완료: 2013.01.31