

플럭스 타워 관측 자료 및 통합수문모형을 이용한 순복사량 산정: 설마천, 청미천 유역을 대상으로

Net Radiation Estimation Using Flux Tower Data and Integrated Hydrological Model: For the Seolmacheon and Chungmicheon Watersheds

김 다 은* / 백 종 진** / 정 성 원*** / 최 민 하****

Kim, Daeun / Baek, JongJin / Jung, Sung-Won / Choi, Minha

Abstract

Spatial heterogeneous characteristics of solar radiation energy from Climate Change gives rise to energy imbalance in the general ecological system including water resources. To understand energy flow, flux towers are up and running throughout the world. In step with, in domestic major areas, there have been observed using several flux towers. In this study, downward shortwave radiation, downward long wave radiation, and net radiation that take important part in hydro-meteorology and ecology were calculated by proposed physical equations using flux data of the Seolmacheon and Choengmicheon, then, the calculated net radiation and observed net radiation were individually compared and validated. The results confirmed applicability of physical methods for insufficient hydro-meteorological data and possibility for observed data of hydro-meteorological variables.

Keywords : flux tower, net radiation, downward shortwave radiation, downward long wave radiation, common land model

요 지

기후변화로 야기될 수 있는 태양복사에너지의 공간적인 불균형은 수자원을 포함한 전반적인 생태 시스템에서의 에너지 불균형을 초래한다. 따라서 정확한 에너지의 흐름을 이해하기 위하여 정량적인 관측을 목적으로 하는 플럭스 타워가 세계 곳곳에 설치되어 운영되고 있다. 국내의 주요 지역에서도 플럭스 타워를 통한 관측이 실시되고 있는 데, 본 연구에서는 이 중 설마천과 청미천 유역의 플럭스 타워의 자료를 대상으로 수문기상 및 생태학적으로 중요한 역할을 하는 에너지원인 하향 단파 및 장파 복사량과 순복사량을 기존의 연구에서 제안된 물리식을 기반으로 계산하고, 산정된 순복사량과 관측 자료를 비교·검증하였다. 이를 통하여 관측이 미흡한 수문기상인자에 대해 기존의 물리적인 방법의 사용 가능성 및 관측 자료의 활용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 플럭스 타워, 순 복사에너지, 하향 단파복사량, 상향 장파복사량, Common Land Model

*한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석·박사통합과정 (e-mail: daeun@hanyang.ac.kr)

Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**한양대학교 공과대학 건설환경공학과 석·박사통합과정 (e-mail: jibaek@hanyang.ac.kr)

Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***유량조사사업단 단장 (e-mail: swjung@hsc.re.kr)

Head, Hydrological Survey Center

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

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

1. 서론

기후변화와 산업화로 인한 도시 인구의 증가, 무분별한 개발 등으로 인하여 대기 중의 이산화탄소가 증가함에 따라 태양복사에너지의 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. 따라서 에너지의 정량적인 파악을 목적으로 전구 플럭스 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 관측에서 한 축을 담당하고 있다. 이러한 플럭스 데이터를 사용한 연구는 다양한 목적으로 이루어지고 있다. Choi et al. (1999)은 에디 공분산 방법의 이론적인 배경을 살피고, 자료의 검·보정을 통해 농림생태계와 대기간의 상호 순환을 이해하며, 고품질의 관측 자료를 생산하기 위해 연구하였다. Ryoo and Kim (2000)는 광릉수목원에서의 증발산량의 변화를 에디 공분산 법으로 측정된 증발산량과 Penman 법으로 추정된 증발산량과의 비교를 하였으며, 산지지역의 가을에서부터 초겨울까지 증발산량 변화 특성을 연구하였다. Choi et al. (2005)은 광릉 플럭스 타워의 30분 평균 자료를 2000년 4월부터 2003년 9월간 분석하여 미기후 자료들 간의 관계를 파악하였으며, 물과 탄소 순환에 관련된 자료의 보정과 검정에 대한 정보를 제시하였다. Flux 자료에서 외부적인 요인들로 인해 이산되는 값들을 미기상적/통계학적 분석에 근거하여 품질관리가 필요하다고 언급하였고, Kwon et al. (2007)은 KoFlux 관측지에서 30분 평균 자료들을 총 5단계의 구분을 통해 품질관리를 실시하였다. 이 연구에는 풍향 계산, 이산치의 검정, 좌표 회전 등의 품질관리가 필수적이며, 또한 미기상학 이론에 근거하여 관측치의 특성과 사용자 주관적 해석이 필요하다고 나타내었다. Kang et al. (2009)은 광릉 관측소 하부 군락부에서의 침엽수림과 활엽수림 식생 차이에 따른 증발산의 영향에 대해서

연구하였다. 이 연구를 통해 하부 군락부에서의 증발산이 총 증발산에 적지 않은 영향을 미친다는 결과를 나타내었으며, 모델을 이용하여 플럭스의 순환을 이해하기 위해서는 이월 또는 다층 모형이 필요하다고 시사하였다.

이렇게 활발한 연구가 진행되고 있는 플럭스 인자들 중 복사는 생태계에서 중요한 역할을 하는 에너지원(Heitor et al., 1991)으로 크게 장파 복사와 단파 복사로 나누어진다. 단파 복사는 주로 낮 시간의 주된 에너지이며, 장파 복사는 낮에도 중요하지만 주로 밤 시간을 지배하는 에너지이다(Kim et al., 2003). 따라서 낮 시간 지표에서의 순복사는 단파 에너지가 지표로 유입되며, 밤 시간에는 대기로의 방출에너지가 주를 이룬다. 이러한 복사 에너지의 관측은 기상 상태에 따라 변화하며, 이에 따른 지표와 대기 사이의 에너지 교환을 해석하기 위하여 필수적인 사항이다.

증발산량 산정을 위하여 다양한 방법이 사용되고 있는데, 수자원 분야에서는 이러한 인자들의 산출을 위하여 유출량, 유입량, 침투량 그리고 저류량의 변화를 통해서 산정되는 물수지(water budget) 방법과 에너지의 유입·유출을 고려한 에너지보존(energy conservation) 법칙을 사용한 에너지수지(energy budget) 방법, 자유 수면으로부터의 물 분자 이동 및 질량이송에 대한 공기동역학적(aerodynamic) 방법, 에너지 수지방법과 공기동역학적 방법을 혼합한 방법 등을 이용하고 있다. 또한 지표면과 대기의 상호관계를 보다 정확하게 해석하기 위해 지표모형을 사용하여 수문기상인자에 관한 정량적인 결과를 획득할 수 있다. Sur and Choi (2011)는 Landsat 위성 자료를 기반으로 한 Mapping EvapoTRanspiration with Internalized Calibration(METRIC) 모형과 MODIS 위성자료로 계산된 증발산의 양상에 대한 비교 분석하였다. Kim et al. (2011)은 Common Land Model(CLM)을 이용하여 해남 지역의 KoFlux 자료 및 Korea Land Data Assimilation System(KLDAS)의 데이터를 통하여 순복사량, 현열, 잠열 등의 수문기상 인자를 산정하고, 관측 자료와의 비교를 모형 및 KLDAS 자료의 사용 가능성을 확인하였다. 이 연구에서 CLM 모형으로 모의된 결과 값과 지점 자료 간에 높은 상관성을 가지는 것을 확인하였으며 모형의 적용가능성을 보여주었다.

본 연구에서는 2010년의 설마천과 청미천 유역에 설치된 플럭스 타워에서 관측한 자료를 대상으로 수문기상학적으로 중요한 요소인 단파 복사량 및 장파 복사량과 순복사량을 산정하였다. 단파 복사량 산정에는 Allen et al. (2007)이 제안한 식을 사용하였으며, 장파복사량은 각각 Brunt (1932), Idso and Jackson (1969), Brutsaert (1975),

Satterlund (1979), Prata (1996)의 식을 사용하여 산정하였다. 산정된 자료를 바탕으로 각각의 순복사량을 산출하였으며, 장파, 단파 복사량을 입력자료로 사용하여 CLM을 구동하였다. 이렇게 산정된 순복사량과 관측된 순복사량과의 비교·검증을 실시하여 관측이 미흡한 수문기상학적 인자에 대하여 계산식을 통한 산정 및 활용 가능성을 검토하였다.

2. 연구 방법 및 기본이론

2.1 연구 대상 지역

청미천 유역은 경기도 이천시 장호원 장호원읍과 여주시 점동에 걸쳐 위치하고 있으며, 유역면적 569.6 km², 유로연장 60.8 km이며, 유역경사가 17.01%이다. 식생의 상태는 하천과 산악사이의 농경지로 이루어져 있으며, 전체적인 비율로 나타낼 경우 산림과 농경지가 48.5%, 43.1%를 차지하고 기타(도심지, 도로 등)가 8.4%를 차지하고 있다 (MLTM, 2008). 설마천 유역은 경기도 파주시 적성

면에 위치하고 있으며, 유역면적이 8.48 km², 유로연장이 5.59 km, 유역 경사가 2%인 전형적인 급경사 산지 사행하천이며, 곡류하천이다. 식생상태는 유역의 90% 이상이 주로 침엽수와 활엽수로 구성되어 있다(Fig. 1, Table 1).

청미천 지역의 플럭스 관측은 2008년 8월부터, 설마천 지역의 관측은 2007년 8월부터 수행되고 있다. 본 연구는 2010년 청미천과 설마천의 관측 자료를 대상으로 진행되었으며, 모형의 구동 기간 또한 이 기간과 동일하다.

2.2 Common Land Model (CLM)

CLM은 대표적인 Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer (SVAT) 모형으로 SVAT 모형은 지표면과 대기의 상호관계를 해석하기 위하여 개발되었다. 또한 이 과정에서 식생을 고려하고, 유출, 토양수분의 변화 등을 산정함으로써 수문기상과 관련한 현상들을 모의(Calvet et al., 1998)하며, 다른 모형과의 연계 및 알고리즘의 개선을 통하여 모형의 발전과정에서 매개변수가 증가하였다(Franks et al., 1997).

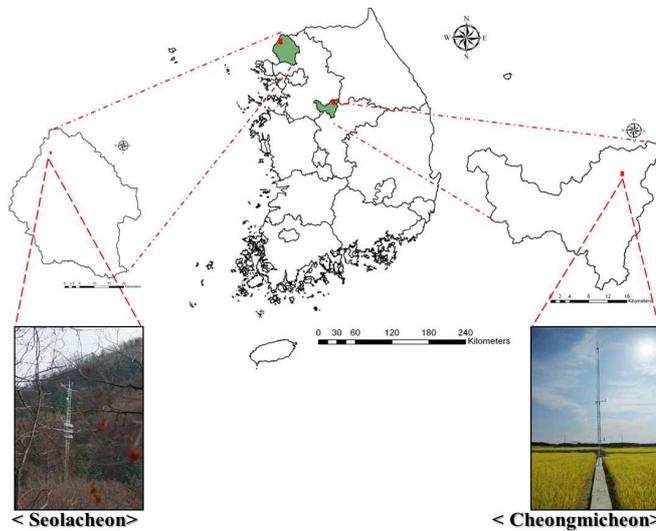


Fig. 1. Flux Sites Locations

Table 1. Flux Sites Informations

Site	Seolmacheon (SMK)	Cheongmicheon (CFK)
Latitude	37° 56' 18" N	126° 57' 12" E
Longitude	37° 9' 36" N	127° 39' 12" E
Terrain type	Complex terrain	Flat
Vegetation type	Mixed forest	Rice paddy
Elevation	293 m	141 m
Annual temperature	11.5 °C	11.5 °C
Annual precipitation	1,332 mm	1,107 mm
Mesurement period	Aug 2007 - present	Aug 2008 - present

CLM은 미국국립대기과학연구소(National Center for Atmospheric Research; NCAR)에서 개발된 Community Land Model을 기반(Bonan et al., 2002)으로, Land Surface Model (LSM), Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS), Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics LSM 등의 모델이 결합되었다(Dai et al., 2003). 본 모형은 SVAT 모형들 중에서도 사용자 정의 변수가 상대적으로 적지만 신뢰할만한 결과를 산출해낼 수 있어 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

CLM은 토양수분 및 토양 온도 예측을 위하여 10개의 층을 사용하며, TOPography based hydrological MODEL (TOPMODEL)에 기반한 유출 및 침투 계산(Beven and Kirkby, 1979), 각 격자별 계산시 MOSAIC 방법 사용, 18개의 International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) 식생 분류 사용 등이 있다. 이와 함께 각 격자별 대표적인 지표 경계 자료를 사용하여 결과를 좀 더 사실적으로 모의한다(Lawrence and Chase, 2007). 모형의 계산은 물수지 방정식과 에너지 에너지수지 방정식을 기반으로 하고 있으며, 이를 기초로 크게 토양수분, 유출 등의 물수지 인자, 복사열, 온도 등과 관련한 에너지 인자를 계산하게 된다.

모형의 구동을 위해서는 초기입력자료와 강제입력자료가 필요하다. 초기입력자료로는 토양성분, 토양 색, 토양의 온도 및 수분 함량 등이 요구되며, 강제입력자료는 하향단파복사(Incoming shortwave radiation), 하향장파복사(Incoming longwave radiation), 강수량(Precipitation), 기온(Air temperature), U 방향 풍속(Wind speed in the U-direction), 기압(Atmospheric pressure), 비습(Specific humidity) 등이 필요하다.

2.3 Flux Tower를 이용한 R_n 산정

수문기상학에서 물의 순환을 이해하는데 물수지 방법과 에너지 수지 방법이 주로 이용되었다. 물 수지 방법은

월·연 단위의 자료를 이용하여 계산 할 경우 높은 정확성을 가지고 있으나, 짧은 기간에서의 정확성은 부족한 것으로 알려져 있다. 그에 반해, 에너지 수지 방법은 유입, 유출되는 에너지간의 수지를 나타냄에 따라 신뢰성과 정확성이 양호하나, 입력변수가 다수 요구된다.

복사에너지는 지표의 에너지 순환에서 가장 중요한 인자로 복사에너지의 총량(순복사, Net Radiation; R_N)에 대한 이해가 필요하다(Fig. 2). R_N 은 Incoming Radiation, Outgoing Radiation, Thermal Radiation, 여러 가지 Flux 등의 parameters를 포함하고 있다(Allen et al., 2007; Jung et al., 2009).

Flux Tower를 이용하여 순복사를 계산하기 위해서 아래와 같은 식들을 이용하여 산정하였다.

$$R_N = (1 - \alpha)R_{sd} + R_{ld} - R_{lu} \quad (1)$$

여기서, α 는 알베도(albedo), R_{sd} (incoming short-wave radiation or solar insolation)는 하향 단파 복사(W/m^2), R_{ld} (incoming long-wave radiation)는 하향 장파복사(W/m^2), R_{lu} (outgoing long-wave radiation)는 상향 장파복사($W m^{-2}$)이다.

$R_L \uparrow$ (outgoing long-wave radiation, R_{lu})은 흑체 표면에서 방출하는 복사열 에너지 총량은 절대온도(T)의 4제곱에 비례한다는 지표면에서 반사하여 방출하는 것으로 기존 Stefan-Boltzmann law을 적용하여 산정하였다.

$$R_{lu} = \sigma \epsilon_s T_s^4 \quad (2)$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_s 는 절대온도(K), ϵ_s 는 광대역 지표 방사율(Broad-band surface emissivity)로 0.97의 값을 가지는 계수를 적용하였다(Evans et al., 1998; Jensen, 2002; Choi et al., 2005; Jung and Shin, 2006).

$R_L \downarrow$ (incoming long wave radiation, R_{ld})을 산출하기 위해 Stefan-Boltzmann 법칙을 기반으로 한 Brunt (1932),

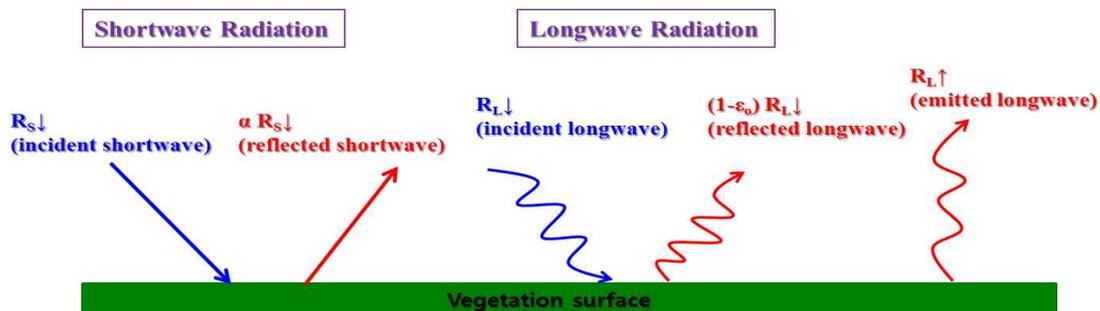


Fig. 2. Conceptual Figure of Surface Radiation Balance (Allen et al., 2007)

Brutsaert (1975), Satterlund (1979), Idso and Jackson (1969), Prata (1996)가 제안한 방법들을 사용하였다. Eqs. (3)~(7)은 위에 언급한 식들을 순서대로 나타낸 것이다.

$$R_{ld} = (a_1 + b_1(e_a^{1/2})) \sigma T_a^4 \quad (3)$$

$$R_{ld} = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{\frac{1}{7}} \sigma T_a^4 \quad (4)$$

$$R_{ld} = 1.08 \left[1 - \exp\left(-e_a^{\frac{T_a}{2016}}\right) \right] \sigma T_a^4 \quad (5)$$

$$R_{ld} = (1 - 0.261 \exp[-7.77 \times 10^{-4}(273 - T_a)^2]) \sigma T_a^4 \quad (6)$$

$$R_{ld} = (1 - (1 + 46.5 \left(\frac{e_a}{T_a} \right))) \exp \left(- (1.20 + 46.5 \times 3 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.5}) \sigma T_a^4 \right) \quad (7)$$

$R_s \downarrow$ (incoming short-wave radiation, R_{sd})을 산출하기 위해 Allen et al. (2007)에서 제시된 ASCE-EWRI (2005)의 유입단파복사량을 이용하였다.

$$R_{sd} = G_{sc} \cos \theta d_r \tau_{sw} \quad (8)$$

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \exp \left[\frac{-0.00146P}{K_t \cos \theta} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos \theta} \right)^{0.4} \right] \quad (9)$$

$$P_{air} = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (10)$$

$$W = 0.14 e_a P_{air} + 2.1 \quad (11)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(DOY \times \frac{2\pi}{365} \right) \quad (12)$$

여기서, G_{sc} 는 태양상수($1,367 \text{ W m}^{-2}$), θ 는 태양 입사각,

d_r 은 지구와 태양 간의 상대 거리의 제곱의 역수, τ_{sw} 는 광대역 대기 투과율로 Allen et al. (1998)과 ASCE-EWRI (2005)에서 제시된 식을 사용하였다. W (precipitable water)는 가능강수수분량(mm)으로 Garrison and Adler (1990)에서 제시된 식을 사용하였으며, P_{air} 는 대기압(kPa), z 는 해수면으로부터의 높이(m), e_a 는 대기온도에서의 실제 증기압(kPa), K_t 는 대기의 투과도를 나타내는 계수로써 $0 < Kt \leq 1$ 의 범위를 가진다. 맑은 하늘에는 최대값인 1.0, 구름이나 대기오염 등으로 인해 투과가 잘 되지 않는 공기에는 0.5를 쓰며, 여기에서는 0.7의 값을 사용하였다. 이들 복사에너지의 산출에 대한 자세한 내용은 Brutsaert (1982; 2005)에 제시되어있다.

2.4 CLM을 이용한 R_N 산정

플럭스 타워 관측 자료를 CLM의 강제입력자료로 이용하여 순복사량을 산출하였다. 모형 구동에 필요한 강제입력자료 중 플럭스 타워에서 관측되지 않은 하향단파복사와 하향장파복사는 각각 Eq. (8)과 Eqs. (3)~(7)로부터 산정된 값을 사용하였다. 따라서 모형은 각각의 지역에 대하여 하향 단파복사 5가지의 경우에 의하여 총 10개 케이스의 순 복사량에 대한 모형의 결과가 산출되었다.

2.5 통계학적 검증

산정된 순복사량과 관측된 순복사량의 비교를 위하여 통계적 방법(Table 2)을 사용하였다. 검증 방법으로는 관측값과 모델값을 비교하여 어느 정도의 오차를 가지고 있는지를 나타내는 Correlation Coefficient, Bias (mean error), Root Mean Square Error (RMSE)를 이용하였다.

여기서, M 은 계산된 값, O 은 관측값, \bar{M} , \bar{O} 은 요소의 평균, N , n 은 요소의 개수이다. Bias, RMSE는 “0”의 값에 가까울수록 model과 관측 값 간의 유사성을 나타낸다.

Table 2. 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)	$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)}{N}$
RMSE (Root Mean Square Error)	$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{N}}$

3. 결과 및 고찰

3.1 $R_S \downarrow$ (incoming short wave radiation, R_{sd})의 비교

Allen et al. (2007)이 제안한 식에 의하여 산정된 하향 단파 복사량의 시계열 그래프는 Figs. 3 and 4와 같이 나타났다. 청미천에 대한 하향 단파 복사량의 최대값은 약 $1,000 \text{ W m}^{-2}$, 설마천에서는 약 $1,290 \text{ W m}^{-2}$ 으로 매우 높게 나타났다. 기존의 연구들에 의하여 하향 단파 복사와 순 복사는 선형적으로 연관지을 수 있으며(Monteith and Szeiez, 1961; Nielsen et al., 1981; Silva and Rosa, 1985), Figs. 3 and 4에

서 나타난 바와 같이 전체적인 경향성이 거의 비슷하다.

3.2 $R_L \downarrow$ (incoming long wave radiation, R_{ld})의 비교

장파 복사 에너지는 모두 다섯 개의 결과(Figs. 5 and 6)가 산정되었다. 이는 모두 일단위로 평균화하여 나타내었다. 복사의 경우 기상상태에 의하여 경향성이 변동되기 때문에 여름 기간의 감소하는 형태는 장마에 의하여 비롯되었을 것으로 예상된다(Andre and Viswanadham, 1983; Heitor et al., 1991). 또한 장파 복사에 대하여 구름의 흡수율은 매우 커 두꺼운 구름은 근사적으로 흑체로 간주할 수

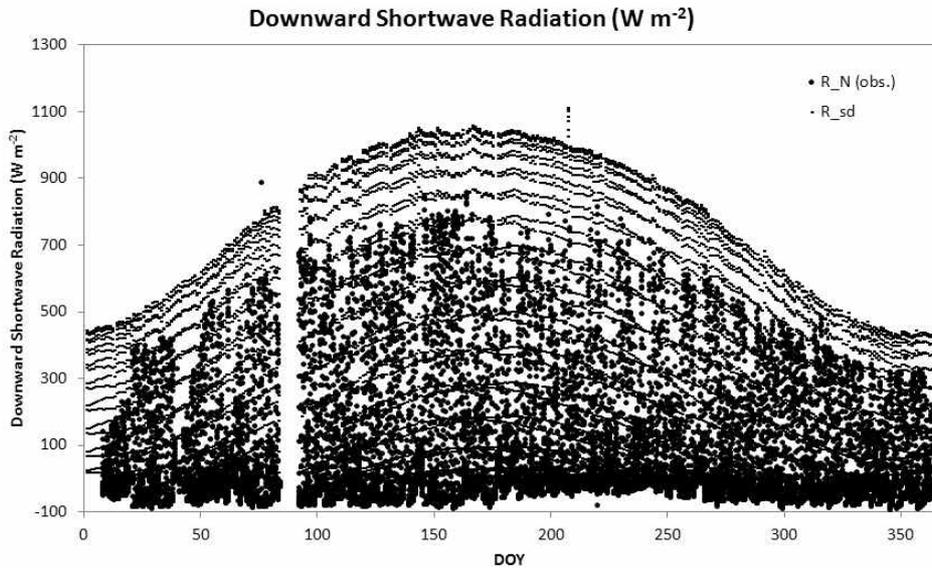


Fig. 3. Calculated R_{sd} and Observed R_n at Chungmicheon Watershed

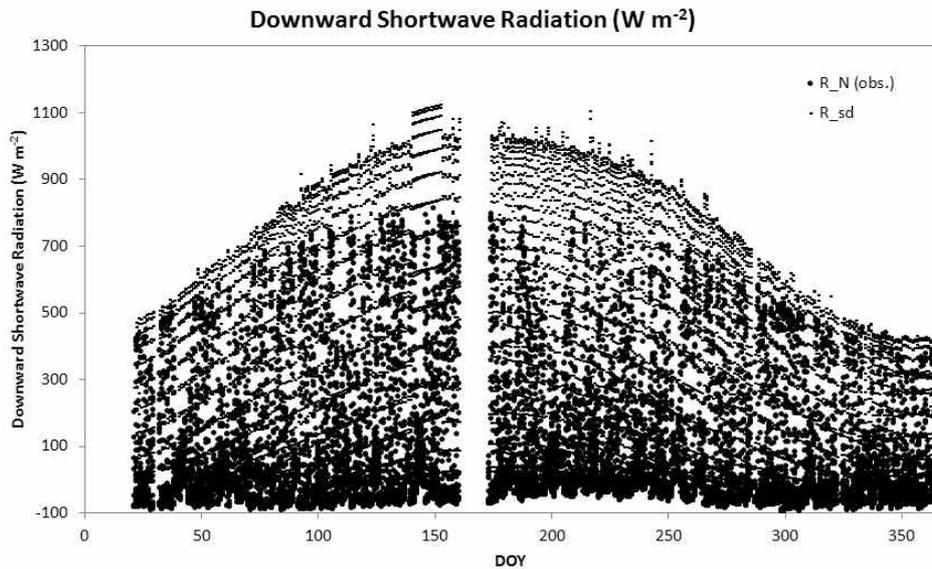


Fig. 4. Calculated R_{sd} and Observed R_n at Sulmacheon Watershed

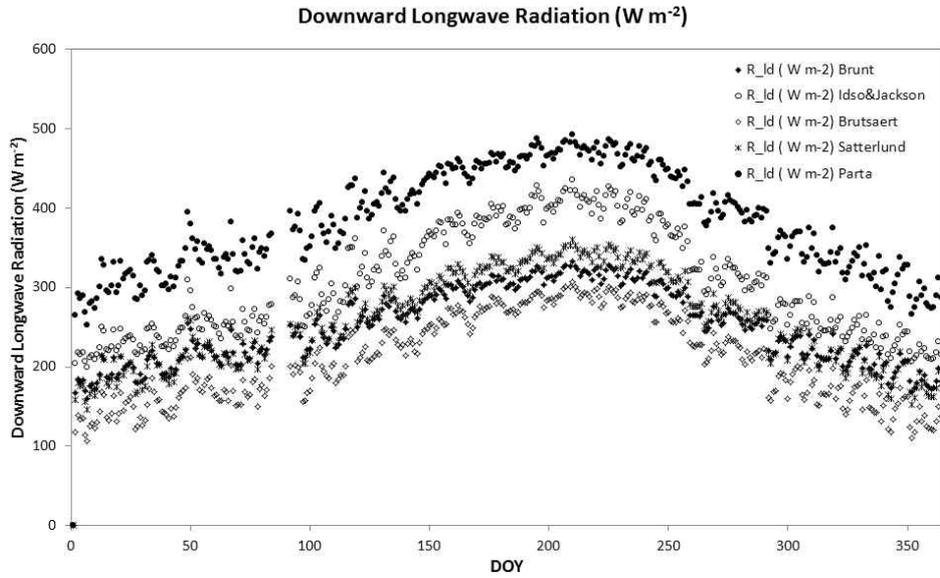


Fig. 5. Calculated R_{ld} at Chungmicheon Watershed (2010)

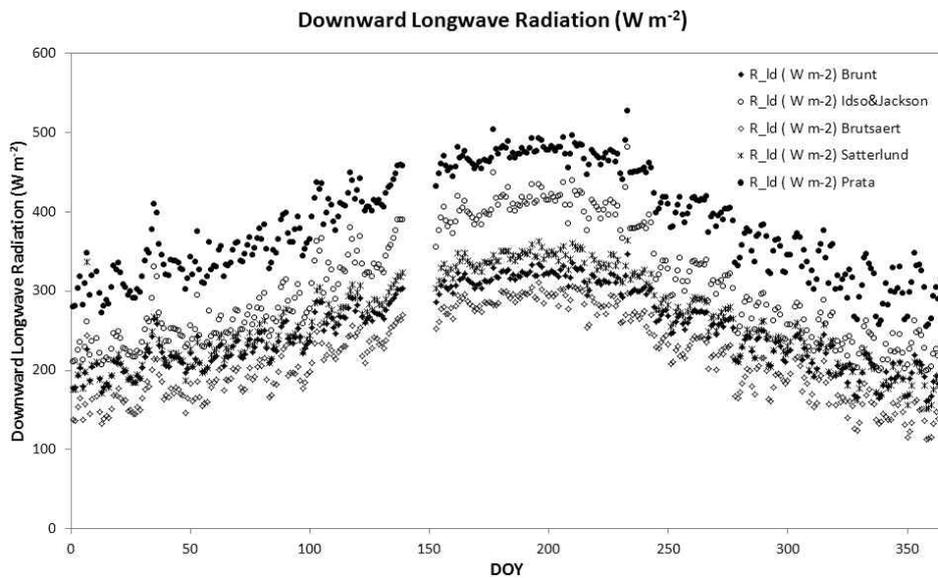


Fig. 6. Calculated R_{ld} at Sulmacheon Watershed (2010)

있으며, 따라서 구름이 많은 장마철이 속한 기간인 여름철의 하향 장파 복사량은 장마철을 기준으로 증가하다 감소하는 형태를 보인다(Kim et al., 2003).

청미천의 하향 장파 복사량은 최대값이 각각 약 300 W m^{-2} (Brunt), 약 400 W m^{-2} (Idso and Jackson), 약 250 W m^{-2} (Brutsaert), 약 320 W m^{-2} (Satterlund), 약 480 W m^{-2} (Prata), 설마천은 약 280 W m^{-2} (Brunt), 약 400 W m^{-2} (Idso and Jackson), 약 250 W m^{-2} (Brutsaert), 약 320 W m^{-2} (Satterlund), 약 480 W m^{-2} (Prata)으로 전반적으로 Prata의 식을 사용한 경우가 두 유역에서 장파 복사량이 가장 높게 산정되었다.

3.3 순복사(net radiation, R_n)의 비교

본 연구에서는 2010년의 청미천과 설마천 유역의 순복사량을 산정하였다. 순복사량 산정 시 필수 요소인 단파복사량은 앞에 설명한 다섯 가지 식을 통하여 산정하였으며, 각각의 순복사량과 관측된 순복사량의 비교·검증을 실시하였다. 청미천 유역에 대한 일단위 순복사량 산정 시 계열 그래프는 Fig. 7과 같다. 그래프에서 순복사량의 최대치는 여름 기간에, 최소치는 겨울 기간에 나타났다. 각각의 그래프에 방법에 대하여 Brunt에 의한 장파 복사량

식을 사용한 순 복사량의 최대치는 약 300 W m^{-2} , Idso와 Jackson의 식을 사용한 복사량의 최대치는 약 350 W m^{-2} , Brutsaert 식은 약 250 W m^{-2} , Satterlund는 약 300 W m^{-2} , Prata 식을 사용한 복사량 최대는 약 400 W m^{-2} 의 값으로 산정되었다. 이를 관측치와 비교하였을 때, 결정계수는 약 0.46으로 모두 비슷하게 나타났다. 그러나 RMSE와 Bias에서는 Brutsaert가 제안한 식을 사용한 계산 값이 상대적으

로 좀 더 낮게 나타났다. 또한 관측치와 계산 값의 일대일 그래프에서 그래프의 산포된 경향이 비슷하게 나오는데, 이는 관측 값의 경우 관측 사이사이에 순 복사량이 매우 낮게 나타나는 경우가 있는 반면에 계산을 통한 값은 비교적 시간에 따른 점진적인 증가와 감소가 일정하게 나타나는 복사량을 산정으로 인하여 나타나는 것으로 판단된다.

설마천 유역에서의 산정 값 각각의 최대치는 Table 4

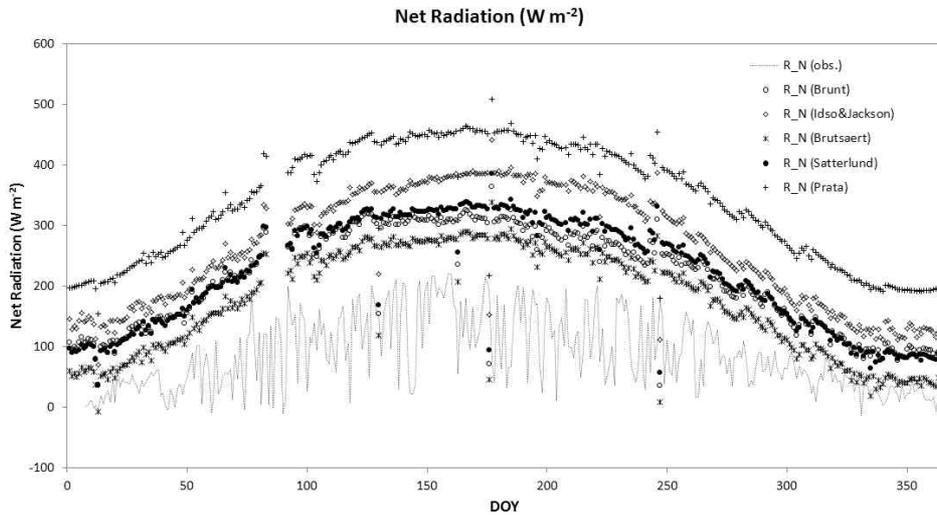


Fig. 7. Time Series of Net Radiation at Chungmicheon Watershed (2010)

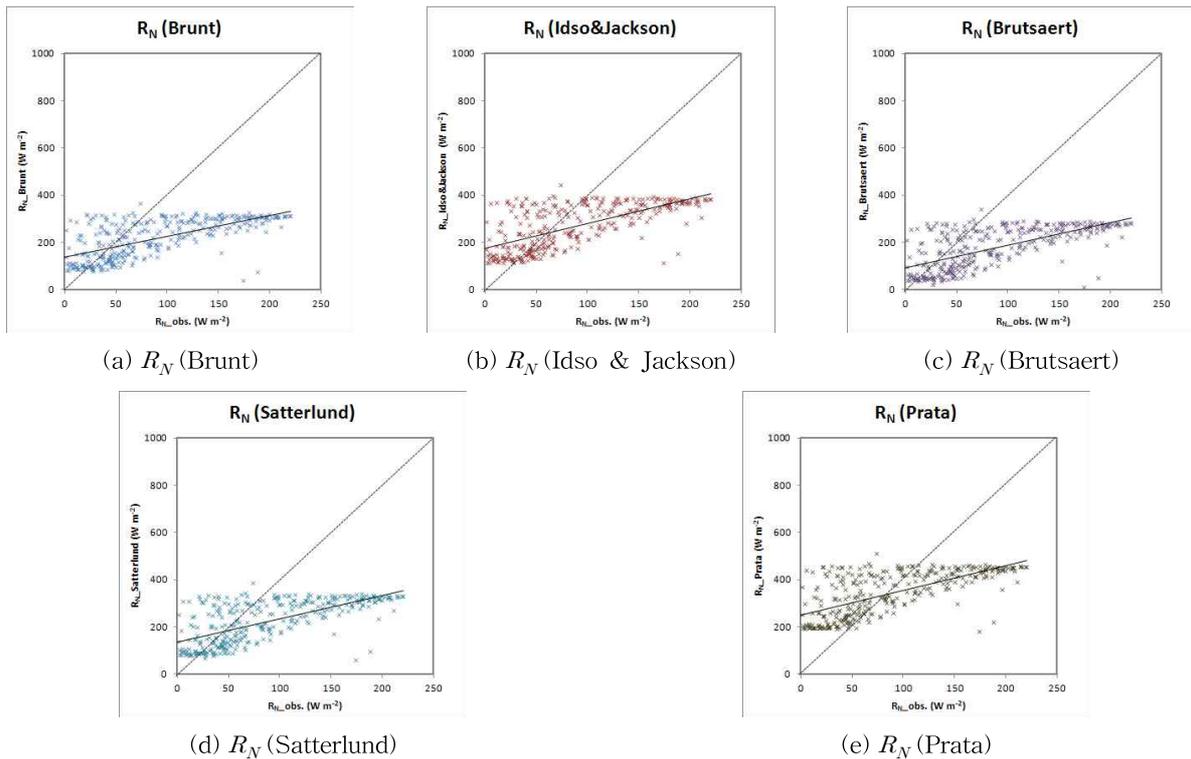


Fig. 8. Comparisons between Observed R_N and CLM R_N at Chungmicheon Watershed (2010)

의 순서대로 약 250 W m^{-2} , 380 W m^{-2} , 280 W m^{-2} , 330 W m^{-2} , 450 W m^{-2} 의 값으로 나타났으며, 청미천과 마찬가지로 대부분의 경우 결정계수가 0.48 정도로 비슷하게 나타났다. 설마천 유역의 결정 계수는 청미천에 비하여 전반적으로 다소 높게 나타났으며, 결측된 수문기상 인자 산정에 물리적인 식을 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다고 판단된다.

설마천 유역과 청미천 유역에 대하여 강제 입력 자료 중 하향 장파 복사량의 다섯 가지 경우를 사용한 CLM 모형의 결과를 산출하였다. 청미천에서 각각의 순 복사량에 대한 최대 값은 각 케이스의 순서로 약 310 W m^{-2} , 430 W m^{-2} , 300 W m^{-2} , 350 W m^{-2} , 450 W m^{-2} 정도로 과다 산정되었으며, 결정계수는 0.46 정도로 비슷하게 나타났다. 이 중에서도 앞서 설명한 청미천과 설마천 순복사량 계산 결과와 마찬가지로 Brutsaert의 식을 통하여 장파 복사량 산정 후 순 복사량을 산출한 경우가 역시 가장 오차가 적었다. 그러나 앞의 결과와 같이 전반적으로 과다산정 및 오차가 높게 나타나 추후 보정이 필요할 것으로 생각된다.

설마천의 경우에는 2월 초의 데이터가 결측이 많아 2월 2일 이후부터 모형을 구동하였다. 유역의 순복사량 CLM

모형 결과의 통계 분석 또한 기존 설마천 계산을 통한 순복사량의 통계 분석의 결과와 비슷한 경향성을 보였다. 다만 모형의 결과가 경험식에 비하여 좀 더 과소 산정이 되는 경향을 보였으며, 이에 따라 관측치와의 차이가 줄어들며 RMSE와 Bias의 값 또한 좀 더 좋은 결과를 나타내었다.

설마천과 청미천 데이터를 이용하여 계산된 각각의 그래프는 대체적으로 관측치와 일치하는 경향을 보였으나, 전체적으로 살펴보았을 때 계산을 통한 값이 관측 값에 비하여 다소 과다 산정되는 경향을 보인다. 일대일 그래프에서의 일정한 패턴은 앞서 설명한 바와 같이 계산식을 통한 순복사량의 산정에서는 점진적인 경향을 나타내는 반면에 관측치의 경우 기상 상태에 따라 변동이 큰 패턴을 보이는 데에서 비롯된 것으로 여름철의 순복사량 감소는 구름 및 강우의 효과로 판단된다. 특히 관측치에서 복사량이 매우 낮게 나타나는 경우는 강우로 인한 경우 및 관측 기기의 이상으로 발생한 것으로 생각된다. 이로 인하여 관측치와 경험식 및 모델에 의하여 산정된 식의 비교에서 추정된 결정계수에 영향을 미쳤을 것이라고 판단된다. 또한 식생의 성장 기간인 5월 경 부터는 식생의 영향으로

Table 3. Statistical Analysis of Observed and Calculated Net Radiation at Chungmi Basin

	RN (Using Brunt Method)	RN (Using Idso& Jackson Method)	RN (Using Brutsaert Method)	RN (Using Satterlund Method)	RN (Using Prarta Method)
RMSE (W m^{-2})	139.78	189.05	108.99	148.27	259.73
Bias (W m^{-2})	-122.22	-171.51	-84.98	-129.27	-245.40
a	0.88	1.05	0.95	0.98	1.04
b	137.62	174.16	93.79	136.55	250.93
R^2	0.45	0.46	0.45	0.46	0.46

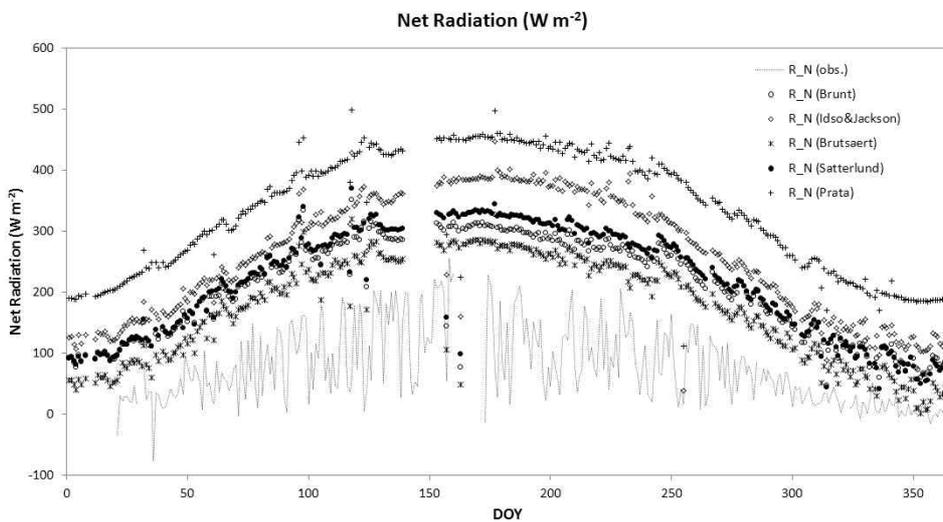


Fig. 9. Time Series of Net Radiation at Sulmacheon Watershed (2010)

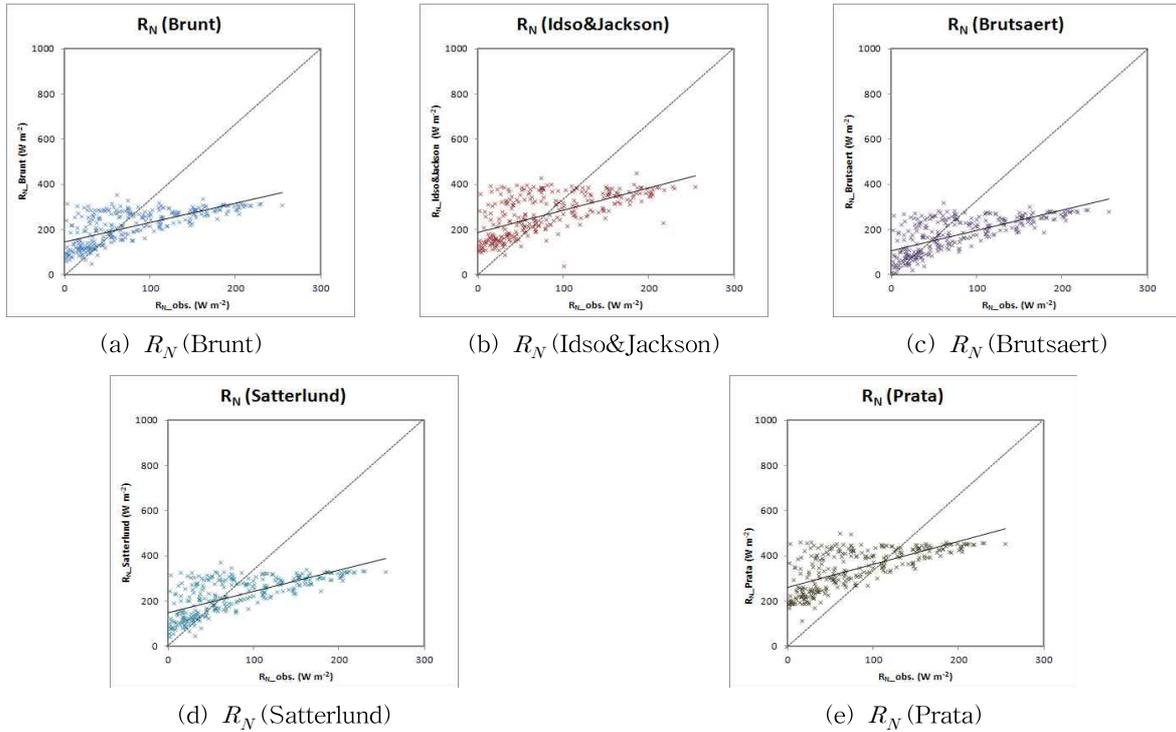


Fig. 10. Comparisons between Observed R_N and CLM R_N at Sulmacheon Watershed (2010)

Table 4. Statistical Analysis of Observed and Calculated Net Radiation at Sulmacheon Watershed

	RN (Using Brunt Method)	RN (Using Idso & Jackson Method)	RN (Using Brutsaert Method)	RN (Using Satterlund Method)	RN (Using Prata Method)
RMSE ($W m^{-2}$)	149.57	199.83	121.19	159.44	267.17
Bias ($W m^{-2}$)	-123.87	-172.10	-90.39	-132.20	-242.16
a	0.86	0.98	0.90	0.95	1.02
b	145.99	188.52	107.63	148.31	260.42
R^2	0.48	0.41	0.48	0.48	0.47

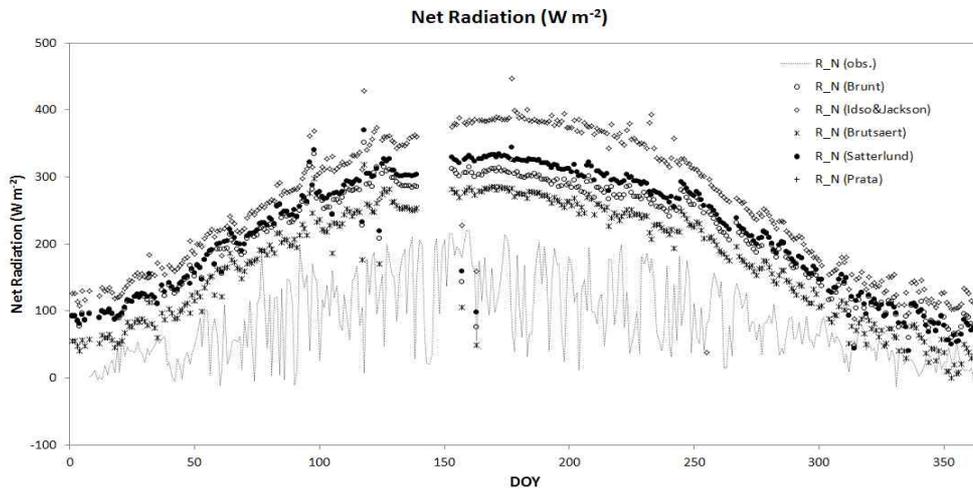


Fig. 11. Time Series of CLM R_N at Chungmicheon Watershed (2010)

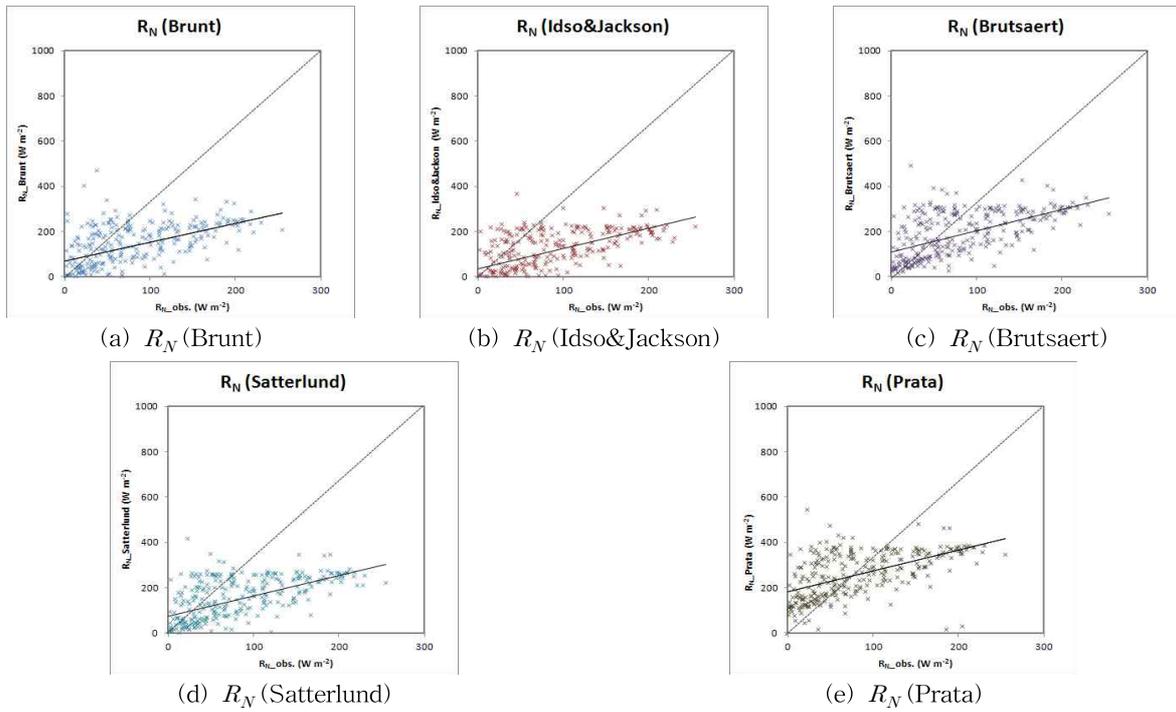


Fig. 12. Comparisons between Observed R_N and CLM R_N at Chungmicheon Watershed (2010)

Table 5. Statistical Analysis of Observed R_N and CLM Results at Chungmicheon Watershed

	Rn_CLM (Using Brunt Method)	Rn_CLM (Using Idso&Jackson Method)	Rn_CLM (Using Brutsaert Method)	Rn_CLM (Using Satterlund Method)	Rn_CLM (Using Prata Method)
RMSE ($W m^{-2}$)	135.32	184.78	107.95	145.09	251.96
Bias ($W m^{-2}$)	-108.37	-156.60	-74.89	-116.70	-226.66
a	0.90	1.10	0.94	0.99	1.08
b	132.21	166.36	93.89	133.47	243.13
R^2	0.46	0.46	0.46	0.46	0.47

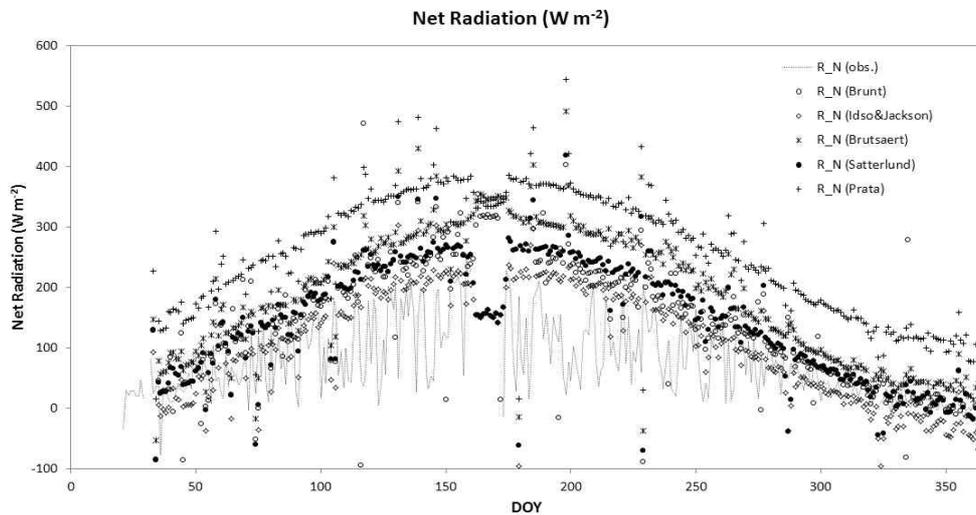


Fig. 13. Time Series of CLM R_N at Sulmacheon Watershed (2010)

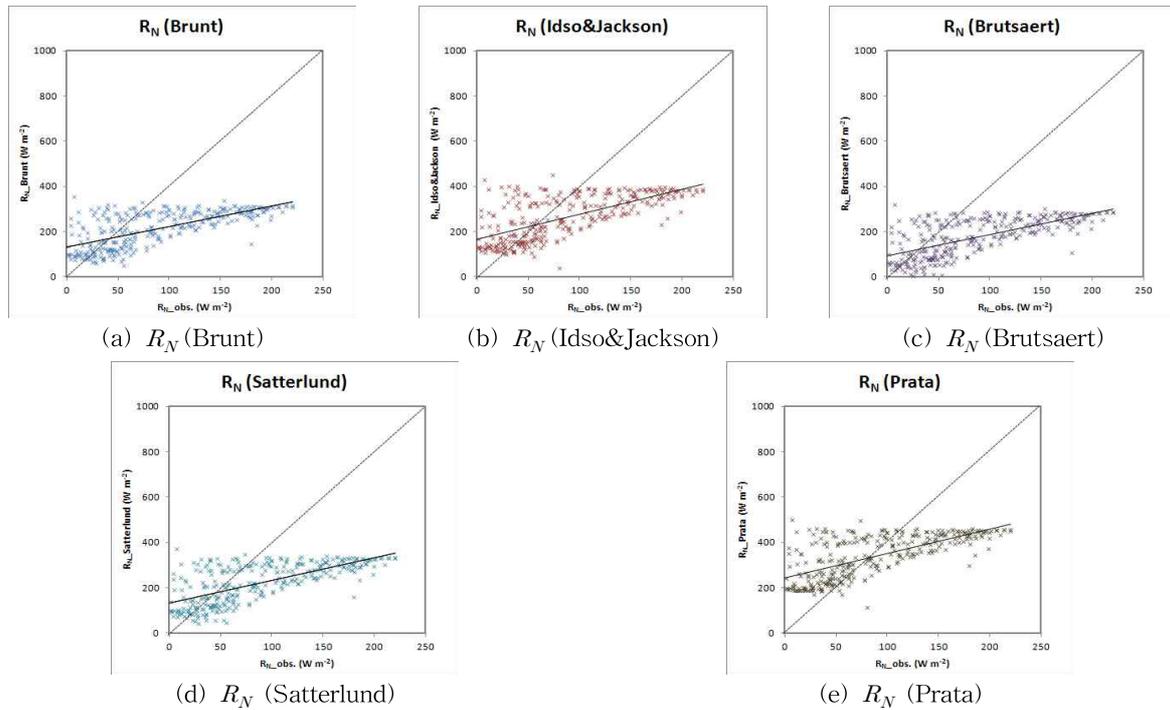


Fig. 14. Comparisons between Observed R_N and CLM R_N at Sulmacheon Watershed (2010)

Table 6. Statistical Analysis of Observed R_N and CLM Results at Sulmacheon Watershed

	Rn_CLM (Using Brunt Method)	Rn_CLM (Using Idso&Jackson Method)	Rn_CLM (Using Brutsaert Method)	Rn_CLM (Using Satterlund Method)	Rn_CLM (Using Prata Method)
RMSE ($W m^{-2}$)	109.66	83.09	142.26	102.81	192.04
Bias ($W m^{-2}$)	-51.88	-28.32	-102.17	-62.65	-163.89
a	0.84	0.90	0.93	0.89	0.92
b	68.84	35.91	109.44	75.13	181.39
R^2	0.28	0.37	0.31	0.32	0.32

알베도가 서서히 감소하게 되고, 이는 복사량의 감소로 이어져 이 기간의 복사량 감소의 이유 중 하나로 추정된다 (Johnes, 1992). 순복사량은 계산 결과와 모형 결과 모두 관측치에 비하여 과다 산정되었으며, 이 정도는 청미천보다 설마천이 더 강하게 나타났다. 이는 하향 장파 복사량의 과다 산정에 의하여 발생된 것으로 판단되며, 추후 보정을 통하여 값을 개선해야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 설마천과 청미천 유역의 플럭스 타워 관측자료를 이용하여 단파 복사량, 장파 복사량 및 순 복사량을 산정하였다. 또한 산정된 단파 및 장파 복사량을 CLM의

강제 입력자료로 이용하여 순 복사량의 결과를 획득하였다. 이렇게 경험식 및 지면 모형을 통하여 산출된 순 복사량을 관측된 순 복사량과 비교·검증을 실시하였다. 청미천의 경우 식을 통해 산정된 결과와 모형의 결과의 관측치와의 비교 결과 대부분 결정계수 약 0.50 정도로 나타났으며, 순 복사량의 산출에 Brutsaert (1975)가 제안한 식을 사용한 경우가 대부분의 경우에서 가장 적은 오차를 나타내었다. 이를 통하여 관측치의 결측 인자에 대하여 산정을 통해 사용 가능성을 확인하였고, 이 과정에서의 모형의 사용 또한 유효함 또한 확인하였다.

추후 플럭스 관측 자료에 대한 연구의 연장으로 복사량과 관련된 인자의 정확도 향상 및 본 연구에서 사용되지 않은 수문기상학적 인자 중 잠열, 현열 등의 에너지 플럭스

스에 대한 산정 및 보정을 실시하여 한반도에서의 수문학적 연구에 활용할 수 있을 것이라고 기대한다. 그리고 설마친 및 청미친 유역의 보정 후의 정확한 데이터 확보를 실시함으로써 경험식 및 모형의 정확도를 확인하는 데 중요한 영향 미치는 인자들의 불확실성을 어느 정도 제거하여 보다 나은 결과를 얻는 데 기여할 것이다. 또한 더 많은 지역에 대한 플럭스 자료로 범위를 확장시킨 연구가 필요할 것이라고 생각된다.

감사의 글

이 연구는 유량조사사업단의 “인공위성자료를 이용한 증발산 및 토양수분의 공간적 mapping 작성 기반구축 및 증발산량 산정 품질관리” 과제와 2012년도 국립환경과학원 “기후변화에 따른 수질 및 수생태 영향평가 모델 개발(II)”의 지원을 받아 수행된 것임.

REFERENCES

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). “Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56.” *FAO*, Rome, Vol. 300, p. 6541.
- 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*, 133, pp. 380–394.
- Andre, R.G.B., and Viswanadham, Y. (1983). “Radiation balance of soybeans grown in Brazil.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 30, pp. 157–173.
- ASCE-EWRI (2005). “The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation.” Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191–4400, pp. 173.
- Beven, K.J., and Kirkby, M.J. (1979). “A physically based, variable contributing area model of basin hydrology.” *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, No. 1, pp. 43–69.
- Bonan, G.B., Oleson, K.W., Vertenstein, M., and Levis, S. (2002). “The land surface climatology of the community land model coupled to the NCAR community climate model.” *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 3123–3149.
- Brunt, D. (1932). “Notes on radiation in the atmosphere.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 58, pp. 389–418.
- Brusaert, W. (1982). *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*. D. Reidel, Norwell, Massachusetts, USA.
- Brutsaert, W. (1975). “On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies.” *Water Resources Research*, Vol. 11, pp. 742–744.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: an introduction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Calvet, J.C., Joel, N., Roujean, J.L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Oliosoc, A., and Wigneron, J.P. (1998). “An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 92, pp. 73–95.
- Choi, T., Kim, J., and Yun, J.I. (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*, *Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–15.
- Choi, T., Lim, J.-H., Chun, J.-H., Lee, D., and Kim, J. (2005). “Microclimatological characteristics observed from the flux tower in Gwangneung forest watershed.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, *Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 7, No. 1, pp. 35–44.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R.E., Baker, I., Bonan, G.B., Bosilovich, M.G., Denning, A.S., Dirmeyer, P.A., Houser, P.R., Niu, G., Oleson, K.W., Schlosser, C.A., and Yang, Z.L. (2003). “The common land model.” *American Meteorological Society*, Vol. 84, No. 8, pp. 1013–1023.
- Franks, S.W., Beven, K.J., Quinn, P.F., and Wright, I.R. (1997). On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 86, pp. 63–75.
- Garrison, J.D., and Adler, G.P. (1990). “Estimation of precipitable water over the United States for applica-

- tion to the division of solar radiation into its direct and diffuse components.” *Solar Energy*, Vol. 44, No. 4, pp. 225-241.
- Heitor, A., Biga, A.J., and Rosa, R. (1991). “Thermal radiation components of the energy balance at the ground.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 54, pp. 29-48.
- Hong, J., Kwon, H., Lim, J.-H., Byun, Y.-H., Lee, J., and Kim, J. (2009). “Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-26.
- Idso, S.B., and Jackson, R.D. (1969). “Thermal radiation from the atmosphere.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, pp. 5397-5403.
- Jeong, S., and Shin, S.C. (2006). “The application of satellite imagery in droughts analysis of large area.” *Journal of Korean Society for GeoSpatial Information System, Korean Society for GeoSpatial Information System*, Vol. 14, No. 2, pp. 55-62.
- Jeong, S., Jang, K., Kang, S., Kim, J., Kondo, H., Gamom, Asanuma, J., Saigusa, N., Wang, S., and Han, S. (2009). “Evaluation of MODIS-derived evapotranspiration at the flux tower sites in East Asia.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 174-184.
- Johnes, H.G. (1992). *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 4288.
- Kang, M., Kwon, H., Lim, J.-H., and Kim, J. (2009). “Understory evapotranspiration measured by eddy-covariance in Gwangneung deciduous and coniferous forests.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 4, pp. 233-246.
- Kim, Y.-H., Cho, K.-S., Kim, H.-T., Um, H.-H., and Choi, H.-T. (2003). “Characteristics of the seasonal variation of the radiation in a mixed forest at Kwangneung arboretum.” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 19, No. 3, pp. 285-296.
- Kwon, H., and Kim, J. (2010). “KoFlux issue : KoFlux’s progress: Background, status and direction.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 4, pp. 241-263.
- Kwon, H., Park, S., Kang, M., Yoo, J., Yuan, R., and Kim, J. (2007). “Quality control and assurance of eddy covariance data at two KoFlux sites.” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Korean Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 9, No. 4, pp. 260-267.
- Lawrence, P.J., and Chase, T.N. (2007). “Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0).” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, G01023.
- MLTM. (2008). “Streamflow investigation report in 2008.” Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Monteith, J.L., and Szeicz, G. (1961). “The radiation balance of bare soil and vegetation.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 87, pp. 159-170.
- Nielsen, L.B., Prahm, L.P., Berkowicz, R., and Conradsen, K. (1981). “Net incoming radiation estimated from hourly global radiation and/or cloud observations.” *Journal of Climatology*, Vol. 87, pp. 159-170.
- Prata, A.J. (1996). “A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiations at the surface.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 122, pp. 1127-1151.
- Ryoo, S.-B., and Kim, Y.-A. (2000). “Variation of evapotranspiration over forest site at Kwangneung: from fall to early winter.” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 1, pp. 43-50.
- Satterlund, D.R. (1979). “An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere.” *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1649-1650.
- Silva, A.M., and Rosa, R. (1985). “Radiative environment inside a greenhouse.” *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 33, pp. 339-346.
- Sur, C., and Choi, M. (2011). “An intercomparison of two satellite data-based evapotranspiration approaches.” *Journal of Korean Wetlands Society, Korean Wetlands Society*, Vol. 13, No. 3, pp. 35-39.

논문번호: 12-080	접수: 2012.07.14
수정일자: 2012.09.28/10.26/11.21	심사완료: 2012.11.21