



## Prediction of future hydrologic variables of Asia using RCP scenario and global hydrology model

Kim, Dawun<sup>a</sup> · Kim, Daeun<sup>b</sup> · Kang, Seok-koo<sup>b</sup> · Choi, Minha<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Dept. of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University

<sup>b</sup>Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University

Paper number: 16-018

Received: 12 February 2016; Revised: 8 April 2016; Accepted: 8 April 2016

### Abstract

According to the 4th and 5th assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global climate has been rapidly changing because of the human activities since Industrial Revolution. The perceived changes were appeared strongly in temperature and concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Global average temperature has increased about 0.74 °C over last 100 years (IPCC, 2007) and concentration of CO<sub>2</sub> is unprecedented in at least the last 800,000 years (IPCC, 2014). These phenomena influence precipitation, evapotranspiration and soil moisture which have an important role in hydrology, and that is the reason why there is a necessity to study climate change. In this study, Asia region was selected to simulate primary energy index from 1951 to 2100. To predict future climate change effect, Common Land Model (CLM) which is used for various fields across the world was employed. The forcing data was Representative Concentration Pathway (RCP) data which is the newest greenhouse gas emission scenario published in IPCC 5th assessment. Validation of net radiation ( $R_n$ ), sensible heat flux ( $H$ ), latent heat flux ( $LE$ ) for historical period was performed with 5 flux tower site-data in the region of AsiaFlux and the monthly trends of simulation results were almost equaled to observation data. The simulation results for 2006-2100 showed almost stable net radiation, slightly decreasing sensible heat flux and quite increasing latent heat flux. Especially the uptrend for RCP 8.5 has been about doubled compared to RCP 4.5 and since late 2060s, variations of net radiation and sensible heat flux would be significantly risen becoming an extreme climate condition. In a follow-up study, a simulation for energy index and hydrological index under the detailed condition will be conducted with various scenario established from this study.

**Keywords:** Climate change, RCP Scenario, Common Land Model, Net radiation, Sensible and latent heat flux

## RCP 시나리오 및 전지구 수문 모형을 활용한 아시아 미래 수문인자 예측

김다운<sup>a</sup> · 김다은<sup>b</sup> · 강석구<sup>b</sup> · 최민하<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>성균관대학교 수자원전문대학원, <sup>b</sup>한양대학교 건설환경공학과

### 요 지

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)의 4차 및 5차 보고서에 따르면 인류 활동에 의한 기후변화가 산업혁명 이후 급속하게 진행되고 있다고 한다. 기후변화는 주로 온도와 이산화탄소 농도의 변화로 감지되는데, 지난 100여년 간 지구 평균 온도는 0.74°C 상승하였으며, 대기 중 이산화탄소의 농도는 최소 800,000년 동안의 최대치를 기록하였다 (IPCC, 2007, 2014). 이러한 기후 변화는 수문학 연구에서 중요한 강수, 증발산, 토양수분 등에도 커다란 영향을 미치므로 이에 대한 꾸준한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 아시아 지역을 대상으로 1951년부터 2100년까지의 주요 에너지 인자들에 대한 모의를 실시하였다. 전 세계적으로 다양한 분야에서 사용되고 있는 Common Land Model을 미래 예측을 위한 기반으로 활용하였으며, 강제입력자료는 기후변화에 대응하기 위하여 IPCC 5차 보고서에 소개된 가장 최신의 온실가스 시나리오인 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway; RCP)를 활용하였다. 과거 기간에 대한 순복사량, 현열 및 잠열에 대한 검증은 Asiaflux 사이트에 속한 5개 지점의 자료를 활용하여 수행하였으며, 모든 인자들에 대하여 모형의 월별 경향성이 관측 자료와 거의 일치함을 확인하였다. 미래 기간의 모의에 대해서는 RCP 4.5 및 RCP 8.5를 활용한 모의 모두 순복사량은 거의 변화가 없었으며 현열은 대체적으로 하강하는 경향을, 이와 대조적으로 잠열의 경우에는 상승하는 경향을 나타내었다. 특히 RCP 8.5를 활용한 결과에서 이 증감폭은 더 크게 나타났으며, 2060년대 후반부터 순복사량과 현열의 변동성이 매우 커지는 등의 극한기후의 특징을 나타내는 것으로 보인다. 추후 연구에서는 본 연구를 토대로 다양한 시나리오를 활용하여 더욱 다양한 조건에서의 에너지 인자 및 다른 수문학적 주요 인자들에 대한 모의를 수행할 예정이다.

**핵심용어:** 기후변화, 대표 농도 경로 시나리오, Common Land Model, 순복사량, 현열 및 잠열

### \*Corresponding Author.

E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

## 1. 서론

산업혁명 이후 화석연료 사용량의 폭발적 증가로 인해 온실가스 배출량 또한 날로 증가하고 있어 갈수록 심각한 문제로 대두되고 있다. 온실가스 배출량의 증가는 무분별한 산지 개간과 산림의 파괴와 맞물려 기후변화를 점점 가속화시키고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)는 1990년 제1차 평가보고서에서 관측상의 한계로 인하여 인간 활동에 의한 기후 변화는 명확하지 않다고 발표했다. 그러나 2007년 제4차 평가 보고서를 통해 기후 변화가 명백한 사실임을 증명하였다. 특히 지난 50년 간의 온난화는 전적으로 인류가 배출한 온실가스 때문임을 밝혀냈는데, 지난 100년 (1906~2005년) 간 지구의 평균 온도는  $0.74^{\circ}\text{C}$  증가하였으며, 1990년 이후 더욱 가속화 될 것으로 예측하고 있다. 1961년부터 2003년 사이에 전 지구의 평균 해수면이 1년에  $1.8\text{ mm}$  씩 증가하였으며, 1978년 이후 북극 빙하 면적이 매 10년 마다 2.7%, 여름에는 4.7% 감소하였다 (IPCC, 2007). IPCC는 또한 2014년 발간한 5차 보고서를 통해서 기후변화의 주범이 인간일 확률을 95%로 상향 조정하였으며, 2100년의 지구 온도 및 해수면 상승치를 각각  $0.2\text{--}4.9^{\circ}\text{C}$ 와  $29\text{--}92\text{ cm}$ 까지 오를 수 있는 것으로 보았다. 대기 중 이산화탄소 등의 온실가스 농도는 이전 800,000년 동안 최고치를 기록했다고 하였다 (IPCC, 2014).

이와 같은 기후변화의 심화 및 가속화는 강수량, 강수 일수의 변화, 집중 호우의 증감 등 강수 패턴의 변화에 영향을 미치게 되고, 이는 토양수분의 변화 및 식생의 증발산에 영향을 끼치는 등 연쇄적으로 수문순환에 상당한 변화를 가져오게 된다. 기후변화의 가속화는 결국 수문순환 변화의 가속화를 초래할 뿐만 아니라 폭염 및 가뭄, 호우 등 극한기후 발생에도 영향을 미쳐 효과적인 수자원 이용을 어렵게 하여 수문학 연구 전체에 지대한 영향을 끼치게 된다. (An et al., 2001)

이처럼 기후변화를 연구해야 할 필요성은 갈수록 더해가지만, 연구의 불확실성 등으로 인하여 아직 미흡한 것이 사실이다. 일반적인 자연재해와는 다르게 매우 긴 기간 동안 몇 세대에 걸쳐 서서히 일어나기 때문에 짧은 기간의 관측으로는 그 징후와 진행상황 등을 쉽게 알 수가 없기 때문이다. 또한 관측을 위한 시설을 세우더라도 긴 기간 동안 시설을 유지하며 관측을 계속 하는 것은 재정 및 여하의 문제로 인해 꾸준한 연구를 진행함에 있어 많은 어려움을 수반한다. 기후변화 연구에 따르는 또 다른 어려움은 기후변화에 영향을 주는 요소가 너무나 많고 복잡적이기 때문에 기후 변화의 징후를 포착하기 쉽지 않고, 변화의 양상을 한 번에 알아채기 어렵다는 것

이다.

이에 따라 IPCC에서는 기후변화에 대응하기 위하여 기후 변화 시나리오를 발표하고 있다. 기후변화 시나리오는 온실가스, 에어로졸 등의 인위적 원인에 의한 기후변화에 대한 전망을 위하여 수치모델을 활용하여 계산된 미래기후의 정보이다. 현재까지 발표된 기후변화 시나리오 중 가장 최신은 IPCC 5차 평가보고서에서 발표된 대표농도경로 (Representative Concentration Pathway; RCP)로 태양 복사강제력에 대한 가정에 따라 4가지 시나리오로 나뉘어져 있다. (IPCC, 2014) 기후변화에 대한 영향을 파악하기 위해서는 이러한 미래예측 시나리오를 활용하여 수문 분야의 영향을 파악하는 것이 매우 시급하다.

또한 이와 함께 미래 예측을 위하여 다양한 수문 모델을 활용하는 것이 중요하다. 지난 30여년 간 다양한 모형들이 만들어졌고, 개량 및 통합 등의 과정을 통해 발전되었다. 이러한 모형들은 가장 간단한 수준의 energy balance 모수화 모형으로부터 수문순환 전 과정을 다루는 매우 복잡한 토양-식생-대기 순환 모델 (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Model; SVAT Model)에 이르는데, 주로 식물생리학, 지질학, 기상학 등의 연구 결과와 현장에서 습득한 경험식 등을 토대로 하여 구성된다. 많은 경우, 모형의 구성 함수들은 현장에서의 관측 결과 보다는 실험실에서의 이상적인 환경에서 반복적으로 실험을 하여 도출된 실험 결과들을 기반으로 하는 경우가 대다수이다. 그런데 모든 조건에 대하여 실험을 수행할 수는 없기 때문에 일정한 가정과 특정 조건 아래서 실험을 하게 되는데 때때로 이러한 방식의 실험 결과가 실제 현장 관측치와 모의 결과 간의 큰 차이를 야기하기도 한다.

따라서 특정 모형이 실제의 지표 및 수문순환을 더 잘 반영하기 위해서는 적용 적합성 평가 단계를 거치는 것이 필수적이다. 상술한 모형의 구축 과정으로 인한 차이뿐 아니라 앞서 서술했던 특정 지역마다 나타나는 고유한 연구 제한 사항 혹은 특성을 더 잘 반영하기 위해서도 이 단계를 반드시 수행하여 모형 구동 결과와 지점 자료를 비교하여 이 모형이 얼마나 신뢰할 만 한지, 실제 수문순환을 얼마나 잘 반영하고 있는 지 적합성 평가가 선행되어야 한다. 따라서 국내외에서 다양한 수문 모형에 대한 적합성 평가가 활발하게 이뤄져 왔다. Whitfield et al. (2006)은 미 남부 Florida의 Prairie Wetland 지역에서의 Common Land Model의 적합성 검증을 실시하였으며 토양 수분량 (soil moisture content), 함수량 (water content), 순복사량 (net radiation;  $R_n$ ) 등의 모의 결과가 플럭스 타워 관측치와 일치함을 확인하였다. Choi et al. (2010)은 비균질한 농경지에서 CLM 2.1 버전을 구동하였으며, 순복사량, 현열 (sensible heat flux; H), 잠열 (latent heat flux; LE)에

대한 모의 결과를 해남 지역의 플렉스 타워 관측치와 비교하였는데 각 인자를 통계적 기법을 통하여 자료가 제한적인 한반도 내에서의 모의 적용 적합성을 평가하였다. Kim et al. (2010)은 동아시아 전체를 대상으로 하여 CLM 4.0 버전의 수문순환을 모의하였는데, 식생역학이 포함된 결과와 포함되지 않은 결과를 각각 MODIS 관측 자료와 비교하여 분석하였다. 이 연구를 통해 CLM 4의 광합성량 과대모의 경향성이 동아시아 지역에서도 적용된다는 것을 밝혀냈으며, 이를 보정하기 위하여 Farquhar-Collatz 방법을 통해 분석하고 최대 광합성량 관련 parameterization에 대한 검토 필요성을 역설했다. Jang et al. (2013)은 해남 및 광릉 KoFlux 자료와 Noah LSM의 순복사량, 현열 및 잠열 모의 결과를 비교하여 한반도에서의 Noah LSM 적합성을 평가하였다.

그러나 현재까지 미래 기후변화 시나리오를 활용하여 주요 수문인자들에 대한 기후변화 영향 평가에 대한 연구는 아직 미흡한 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 아시아 지역을 대상으로 RCP historical, RCP 4.5, RCP 8.5 자료를 강제입력자료로 CLM을 구동하여 순복사량, 현열 및 잠열을 모의하였다. 이 때 RCP historical 자료를 기반으로 한 CLM 모의 결과를 플렉스 타워 5개 지점에서 관측한 순복사량, 현열 및 잠열의 2003~2005년까지의 월별 데이터와 비교·분석하였으며, 각각 통계적 검증을 거쳐 신뢰성 검증을 하였다. 이 모의 자료를 토대로 아시아 지역에서의 미래 수문인자 변화 양상을 예측하였다.

## 2. 기본이론 및 데이터

### 2.1 연구 대상 인자

지구 물 순환의 가장 큰 driving force는 태양 복사 에너지 (solar radiation energy)라 알려져 있다. 태양으로부터 방출되어 지구로 흡수된 태양 복사 에너지는 대기 및 지표, 수계 (water system)와 상호작용하여 현열과 잠열, 지표열 등의 형태로 바뀌어 지구-대기 시스템에 저장된다. 이 과정에서 증발, 강수 등의 기상 현상을 일으키고, 동시에 강수량, 토양수분량, 유출량 등 수문 인자에 영향을 미친다. 특히 잠열의 형태로 저장된 에너지는 수표면 및 식생의 증발산과 같은 미시적 규모에서부터 적도와 극지방 간의 거대한 에너지 교환에 이르는 등 지구 전체의 에너지 순환에 매우 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 수문 연구에 있어 이와 같은 에너지 지표에 대한 산정은 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 대한 주요 수문인자인 순복사량, 현열 및 잠열을 모의하였다.

### 2.2 Common Land Model

CLM은 미국의 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 만들어진 가장 대표적인 SVAT 모델 중 하나이다. CLM의 역사는 1990년대 중반으로 거슬러 올라가는데, 초창기에는 NCAR의 Community Climate System Model (CCSM)의 지표 모형으로부터 시작되었다. 여기에 당시 여러 연구자료들에 의해 가장 잘 입증되어 있던 세 가지 모듈화된 지표모형을 결합하였는데, Land Surface Model (LSM), Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS), 1994년 버전의 Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics LSM (IAP94)이 그것이다 (Dai et al., 2003). CLM은 다른 모델과 결합하기 쉽도록 설계되었는데, 98년 말 FOTRAN 90으로 초기 코딩된 이후 계속해서 검증과 개선 과정을 반복하여 현재는 가장 신뢰할 만한 지표-식생-대기 순환 모형으로 알려져 있으며 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있다 (Dai et al., 2003).

CLM은 여러 검증들을 통해 그 신뢰성이 높게 평가 되는 모형임에도, 모의 구동에 필요한 사용자 변수가 상대적으로 적은 편이다. 초기 입력자료로는 초기 토양 수분, 초기 토양 온도 특성, 초기 대기 온도 등이 필요하며, 강제 입력 자료로 하향 단파복사, 하향 장파복사, 강수량, 대기 온도, 풍속, 대기 압, 비습 등이 필요하다. 매개변수로는 위도, 경도, 토양 특성, 토양 색, 강제 입력 자료 측정 높이, 토지 피복 백분율 등이 있다.

CLM의 주요 특성은 다음과 같다. (1) 10개의 비균일 토양층 (10 uneven layers)을 사용하여 토양 수분 및 온도 계산, (2) 5개의 비균일 토양층을 사용, 빙설 및 융설에 대한 계산, (3) 수리 전도도 (hydraulic conductivity)의 지수적 감소 조건 하 basic TOPography based hydrological MODEL (TOPMODEL, Beven and Kirby, 1979)에 의한 유출 및 침투 계산, (4) 격자 방식의 에너지 및 물 수지 방정식 계산 등으로 정리할 수 있다 (Choi et al., 2010).

CLM을 이용한 모의에 있어 가장 핵심적인 개념은 water mass balance equation Eq.(1a)와 energy (heat) conservation equation Eq.(2b)를 포함한 governing equations of physical processes이다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k dV = - \int_S U_k \cdot dS + \sum_k \int_{\Delta V} M_{kk} (1 - \delta_{kk}) + \int_{\Delta V} S_{kd} dV \quad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=i,l,v,d} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = - \sum_{k=i,l,v,d} \int_S U_k h_k \cdot dS + \int_S \lambda \nabla T \cdot dS + \int_{\Delta T} R dV \quad (1b)$$

여기서  $V$ 는 통제 부피 (Control Volume;  $m^3$ ),  $T$ 는 절대 온도 (Absolute Temperature;  $K = \text{C} + 273.16$ ),  $\rho_k$ 는 Constituent  $k$  내재밀도 (Intrinsic Density of Constituent  $k$ ;  $kg\ m^{-3}$ ),  $\theta_k$ 는 Constituent  $k$  부분부피 (Partial Volume of Constituent  $k$ ;  $m^3\ m^{-3}$ ),  $h_k$ 는 비엔탈피 (Specific Enthalpy;  $J\ kg^{-1}$ ),  $U_k$ 는 질량속 (Mass Flux;  $kg\ m^{-1}\ s^{-1}$ ),  $M_k$ 는 상변화 (Phase Change;  $kg\ m^{-3}\ s^{-1}$ ),  $\delta_{kk}$ 는 크로네커의 델타 (Kronecker Delta),  $S_k$ 는 Source or Sink Term,  $\lambda$ 는 열전도율 (Thermal Conductivity of the Medium;  $W\ m^{-1}\ K^{-1}$ ),  $R$ 은 복사속 (Radiation Flux;  $W\ m^{-2}$ )이다 (Choi et al., 2010, Kim et al., 2011).

### 2.3 데이터

IPCC는 미래 기후변화에 미치는 인간활동의 영향을 예측하기 위하여 3차 평가보고서에 쓰였던 배출 시나리오에 관한 특별 보고서 (Special Report on Emissions Scenario; SRES)를 5차 평가보고서에서는 RCP 시나리오로 업데이트하였다. 모형을 통한 모의에는 해당 모의 기간 동안 꼭 필요한 몇 가지 변수들이 있는데, 이를 강제 입력자료 (forcing data)라 하며 일반적으로는 관측에 의하여 수집된다. 다만 미래 기간에 대한 모의는 관측에 의한 강제입력자료 수집이 불가능하기 때문에 이 강제 입력자료를 미리 구축한 이후에 모의를 해야 하는데, 미래 기간에 대한 강제 입력자료에 해당하는 자료가 RCP 시나리오이며, 복사강제력이라는 개념에 의하여 4가지로 분류된다. 복사강제력은 자연적, 인위적으로 변화한 지구의 총 에너지수지를 수치화한 것으로 1750년을 기준으로 하였을 때 에너지수지의 상대적인 변화량으로 나타내며 2011년의 인위적인 총 복사강제력은  $2.29\ W\ m^{-2}$ 이다. RCP 시나리오는 2100년의 총 복사강제력을  $2.6\ W\ m^{-2}$ ,  $4.5\ W\ m^{-2}$ ,  $6.0\ W\ m^{-2}$ ,  $8.5\ W\ m^{-2}$ 의 4단계로 나누어 분류하였으며 각각 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 등으로 명명하였다 (Park et al., 2014).

IPCC 5차 평가보고서에서 제공되는 RCP 시나리오는 전 지구를 대상으로 모의영역이 설정되어 있으며, 공간 해상도가 수백 km에 달해 지나치게 넓은 단점이 있다. 이 때문에 국지 규모의 모의를 수행할 때 낮은 공간 해상도로 인해 소규모의 기후 현상을 제대로 나타내지 못하는 경우가 있으며, 특히 바다 가까이에서 여러 방향으로 산맥이 형성되어 있는 한반도와 같은 복잡한 지역을 대상으로 한 모의에서는 해당 지역의 기후적 특성을 제대로 반영하지 못한다는 한계점을 드러내고 있다 (Oh et al., 2011a and 2011b). 따라서 이를 극복하기 위해 전 지구 기후 모델 (Global Climate Model; GCM)로부터 지역 기후 모델 (Regional Climate Model; RCM)로 규모를

축소시켜 많은 연구들이 진행되고 있으며, 세계 각 지역마다 여러 RCM들이 개발되고 있다. 하지만 이런 RCM들은 모델의 초기 데이터, 강제 입력 자료, 모의 영역, 공간 해상도 등에 따라 모의 결과에 큰 차이가 생기는 경우가 많다. 따라서 RCM의 신뢰성 제고를 위하여 각 지역별로 RCM 간의 상호 비교를 위한 프로젝트가 진행되고 있는데 COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX)는 그 대표적인 예이다.

본 연구에서는 CORDEX에서 제공된 2005년부터 2100년까지의 RCP 시나리오 자료를 강제 입력자료로 활용하였다. RCM으로 HadGEM3-RA를 사용하여 생성되었으며, 이 자료의 공간해상도는  $0.44^\circ$ 이다. 이 자료는 CORDEX 동아시아 영역으로 downscaling 되었으며 longitude 범위는  $-40.92^\circ E \sim 47.96^\circ E$ , latitude 범위는  $-26.84^\circ N \sim 46.20^\circ N$ 이다. 아래 Table 1에 데이터 특성을 나타내었다.

Table 1. Characteristics of RCP forcing data (downscaled by CORDEX)

Spatial resolution	Temporal resolution	Longitude	Latitude	Time period
$0.44^\circ$	Monthly	$-40.92^\circ E$ $\sim 47.96^\circ E$	$-26.84^\circ N$ $\sim 46.20^\circ N$	1950 $\sim 2100$

### 3. 연구지역

본 연구는 한국 및 몽골, 중국 등을 포함한 아시아 지역을 대상으로 수행되었다 (Fig. 1). 모형 결과 검증에 위하여 아시아 지역의 플럭스 네트워크인 AsiaFlux에 속해 있는 플럭스 타워 지점들 중 Southern Khentei Taiga (SKT), Gwangneung Deciduous Site (GDK), Laoshan (LSH), Kherlenbayan Ulaan (KBU), Haibei Potentilla Fruticosa Bosk Site (HBG)의 5개 지점에서 관측된 자료를 사용하였다.

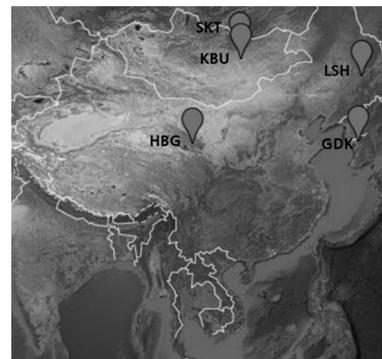


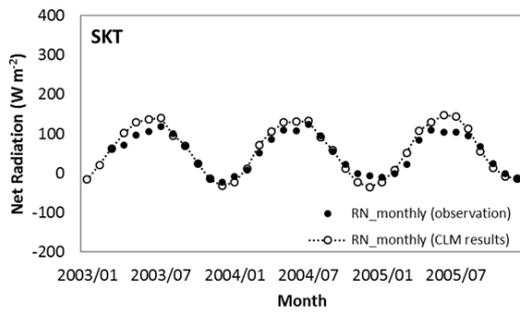
Fig. 1. Study area and validation sites

Fig 1에 5개의 검증지점을 빨간색으로 표시하고 있으며, 검증 지점은 한국 1곳 (GDK), 몽골 2곳 (SKT, KBU), 중국 1곳 (LSH), 티베트 1곳 (HBG)로 몽골에 속한 2지점 및 GDK 지점은 비교적 평평한 지역에, 나머지 2곳은 경사진 지역에 속하여있

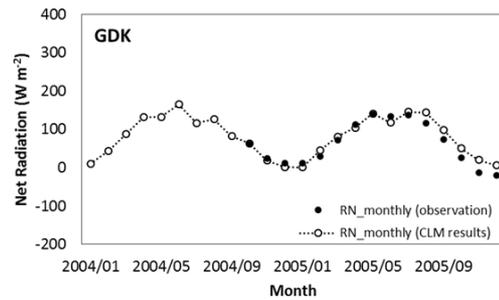
다(Table 2). 검증에 필요한 기간의 자료는 각각의 플럭스 타워에서 제공하고 있는 자료의 기간중 과거 기간에 속하여 있는 자료 중 각각 2년 혹은 3년 자료를 선택하여 사용하였다.

Table 2. Flux tower site info of 5 validation sites

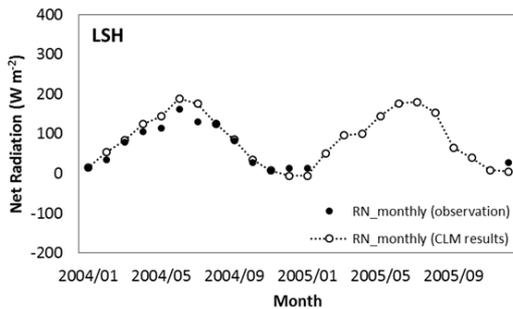
Site	Location	Elevation.	Mean Annual Temp.	Mean Annual Pr.	Land Cover
SKT	48.35°N, 108.65°E	1630 m	-2.9°C	282 mm	Deciduous Needleleaf Forest
GDK	37.75°N, 127.15°E	260 m	11.5°C	1332 mm	Deciduous Broadleaf Forest
LSH	45.28°N, 127.58°E	340 m	2.8°C	724 mm	Deciduous Needleleaf Forest
KBU	47.21°N, 108.74°E	1235 m	1.2°C	196 mm	Grasslands
HBG	37.48°N, 101.20°E	756 m	-1.7°C	600 mm	Grasslands



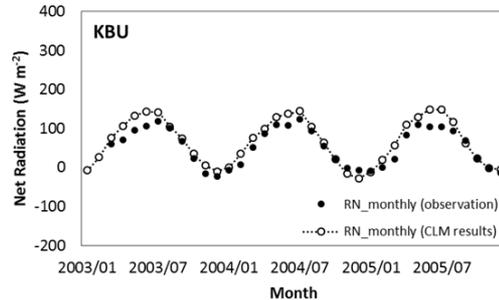
(a)



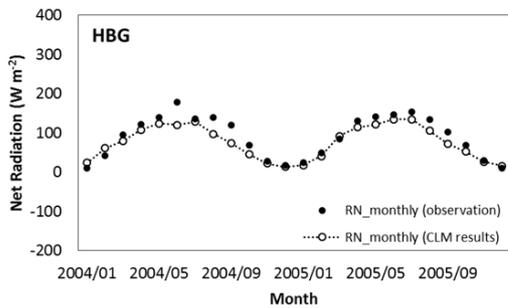
(b)



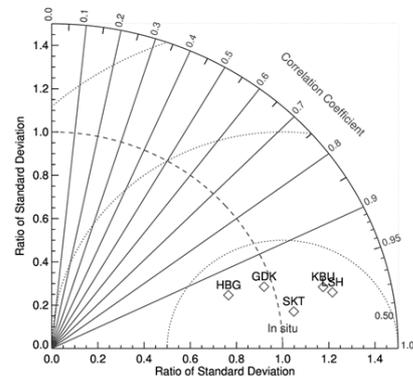
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 2. Observed and estimated net radiation using CLM at (a) SKT, (b) GDK, (c) LSH, (d) KBU, (e) HBG and (f) Taylor diagram of net radiation simulation data

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 RCP 시나리오 신뢰성 검증

본 연구는 아시아를 대상으로 RCP historical, RCP4.5, RCP8.5 자료를 강제입력자료로 CLM을 구동하여 순복사량, 현열, 잠열을 산출하였다. 이중 RCP historical 자료를 활용하여 구동한 모형의 결과를 통해 모형 및 시나리오의 신뢰성에 대한 검증을 실시하였다. 신뢰성 검증은 5개 지역 에디 공분산 기반 플렉스 타워(SKT, GDK, LSH, KBU, HBG)에서 관측된 순복사량, 현열 및 잠열 데이터와 CLM의 모의 구동 결과 데이터를 비교하고, 각 데이터들에 대한 통계적 검증을 수행하였다.

##### 4.1.1 순복사량(Net radiation)

Figs. 2(a)~(e)는 각각 5개의 플렉스 타워에서 관측된 순복사량 데이터와 CLM 모의 구동 결과 데이터를 비교한 그래프이다. Fig. 2(f)는 각 지점 모의 데이터의 신뢰도를 Taylor 다이어그램으로 나타낸 것이며 Table 3은 각 지점 모의 데이터의 통계 수치를 나타내고 있다.

Table 3. Statistic index of CLM net radiation simulation data of 5 validation sites

	SKT	GDK	LSH	KBU	HBG
Normalized Stdev.*	1.062	0.963	1.243	1.209	0.804
Correlation Coefficient	0.987	0.955	0.978	0.972	0.952
Bias	5.071	-8.171	-6.997	15.768	-14.3660
RMSE	11.575	17.873	20.193	22.304	22.728

\*Normalized Standard Deviation: Stdev. of Model Simulation Result Data / Stdev. Of Observation Data (unitless)

순복사량 데이터는 함께 모의한 현열 및 잠열 데이터보다 보다 높은 수준의 신뢰도를 가지는 것으로 나타났다. 모든 지점의 데이터가 상관계수 0.95 이상을 나타내었고, 정규화 표준편차 역시 1로부터 크게 벗어나지 않는 범위 내에서 약간의 변동이 있을 뿐이다. 이는 현열 및 잠열 등 여러 데이터가 복합적으로 관여하는 순복사량의 특성 때문인 것으로 보인다. 지점별로 살펴보면 GDK와 HBG 에서는 다소 과소 모의 되었으며, SKT, LSH, KBU 에서는 다소 과대 모의 되었으나 무시할 만한 수준으로 보인다. Bias의 최소값은 5.07, 최대값은 15.768이며, RMSE의 최소값은 11.575, 최대값은 22.728로 순복사량의 증감을 양호하게 재현했다고 할 수 있다. 정규화 표준편차, 상관계수, Bias 및 RMSE 등 통계 수치를 전체적으로 고려했을 때 SKT 지점의 순복사량의 결과가 가장 잘 모의된 것으로 나타났다.

##### 4.1.2 현열(Sensible heat flux)

Figs. 3(a)~(e)는 각각 5개의 플렉스 타워에서 관측된 현열 관측 데이터와 RCP historical 자료를 강제 입력자료로 사용한 CLM 모의 구동 데이터를 비교한 그래프이고, Table 4는 각 자료들의 신뢰성에 대한 통계 수치를, Fig. 3(f)는 이를 Taylor 다이어그램에 나타낸 것이다. 1년 주기로 여름에 증가하고, 겨울에 감소하는 경향성을 CLM이 상당 부분 흡수하게 모사하고 있으며, 현열 증감하는 시기와 증감 폭 역시 플렉스 타워의 지점 데이터와 거의 일치한다. KBU와 HBG가 비슷한 수준으로 실제 현열의 증감을 모의했으며, 이는 Fig. 3(f)에 나타난 Taylor 다이어그램을 통해 좀 더 명확하게 알 수 있다. GDK의 경우, 상관계수는 0.926으로 높은 편이지만 정규화 표준편차가 다소 크게 나타났으며, LSH 역시 정규화 표준편차가 비교적 높은 편이다. 두 지역 모두 데이터의 손실분이 많은 편인데, 특히 LSH는 다소 과대모의된 부분의 데이터만 남아있기 때문에 통계수치가 좋지 않게 나온 것으로 보인다. SKT 지역에 대하여는 다소 과소모의 되었지만, KBU, HBG 지역에서는 CLM 모의 구동 결과 데이터가 실제의 현열 증감을 매우 잘 나타냈다고 할 수 있다. Bias의 최소값은 -3.613, 최대값은 -21.259이며, RMSE의 최소값은 12.852, 최대값은 33.479이다. 자료 손실분이 많은 LSH 지점에서 모의 수준이 비교적 낮게 나왔으나, 전반적으로 현열의 변동성 및 경향성을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

Table 4. Statistic index of CLM sensible heat flux simulation data of 5 validation sites

	SKT	GDK	LSH	KBU	HBG
Normalized Stdev.	0.721	1.598	1.921	0.915	0.860
Correlation Coefficient	0.959	0.926	0.520	0.906	0.881
Bias	7.179	-6.090	-21.259	9.580	-3.613
RMSE	16.619	12.852	33.479	15.825	13.543

\*Normalized Standard Deviation: Stdev. of Model Simulation Result Data / Stdev. Of Observation Data (unitless)

##### 4.1.3 잠열(Latent heat flux)

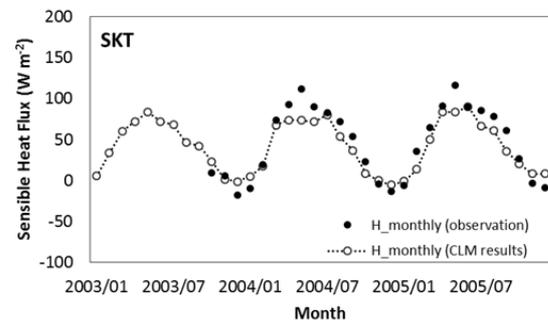
Figs. 4(a)~(e)는 각각 5개의 플렉스 타워에서 관측된 잠열 데이터와 CLM 모의 구동 결과 데이터를 비교한 그래프이며 Fig. 4(f)와 Table 5에 통계 인자를 활용한 분석 결과를 나타냈다. 전반적으로 CLM 모의가 실제의 잠열 증감 경향성을 대체적으로 잘 나타내고 있다. CLM 잠열 모의의 경우 실제 플렉스 타워 데이터와 비교한 정규화 표준편차가 낮은 값부터 순서대로 0.279, 0.642, 0.836, 1.167, 1.484로 나타났으며, GDK 지점을 제외한 4개 지점에서의 상관계수가 약 0.9 정도로 상당히 높게 나타났다 (Table 5). HBG의 경우 그래프 상으로는 차이가 많이 나는 듯 보이나 R 값은 가장 높다. 이것은 이 지점에서 과소모의 된 경향은 있으나, 증감의 추세에 대해서는 가장 잘

모의했기 때문인 것으로 보인다. 상대적으로 다른 지점들에 비해 정규화 표준편차, Bias, 및 RMSE 값이 크게 나타났지만, 잠열의 변동성에 관하여는 잘 모의했다고 할 수 있다. Bias의 최소값은 3.426, 최대값은 -20.113이며, RMSE의 최소값은 10.501, 최대값은 31.220이다. SKT와 HBG 지점에서 약간의 과소모의 경향이 보이긴 하나, 변동성에 대해서는 잘 모의하고 있다.

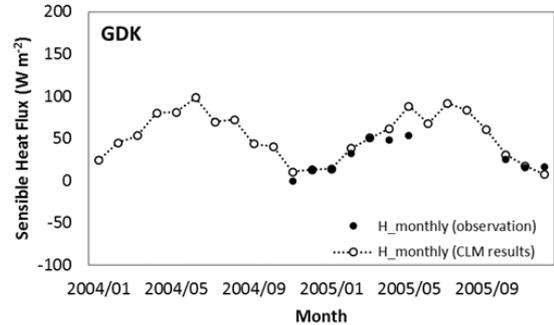
**Table 5.** Statistic index of CLM latent heat flux simulation data of 5 validation sites

	SKT	GDK	LSH	KBU	HBG
Normalized Stdev.	0.642	1.484	0.836	1.167	0.279
Correlation Coefficient	0.869	0.745	0.928	0.878	0.941
Bias	3.426	-9.683	-5.886	5.957	-20.113
RMSE	14.086	12.845	11.323	10.501	31.220

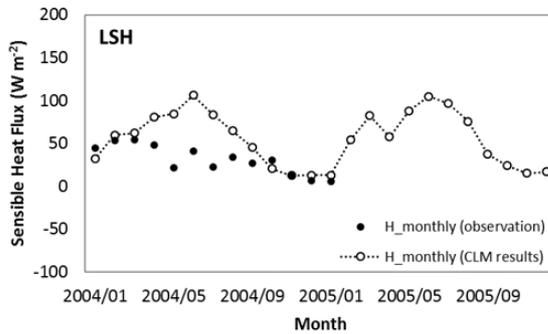
\*Normalized Standard Deviation: Stdev. of Model Simulation Result Data / Stdev. Of Observation Data (unitless)



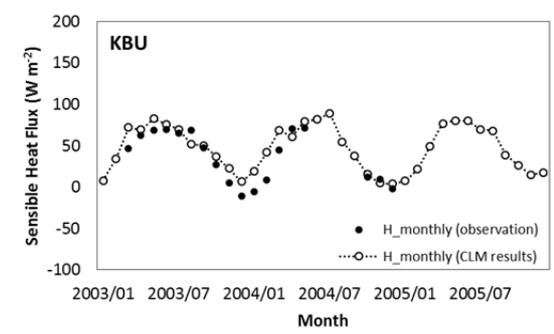
(a)



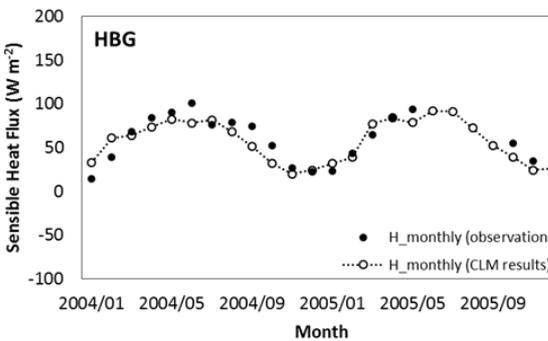
(b)



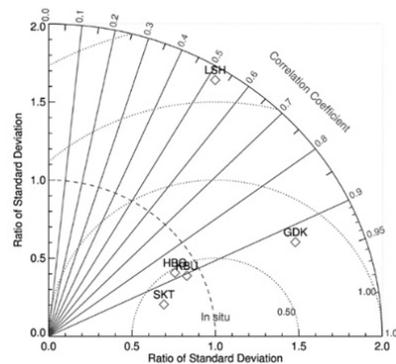
(c)



(d)



(e)



(f)

**Fig. 3.** Observed and estimated sensible heat flux using CLM at (a) SKT, (b) GDK, (c) LSH, (d) KBU, (e) HBG and (f) Taylor diagram of sensible heat flux simulation data

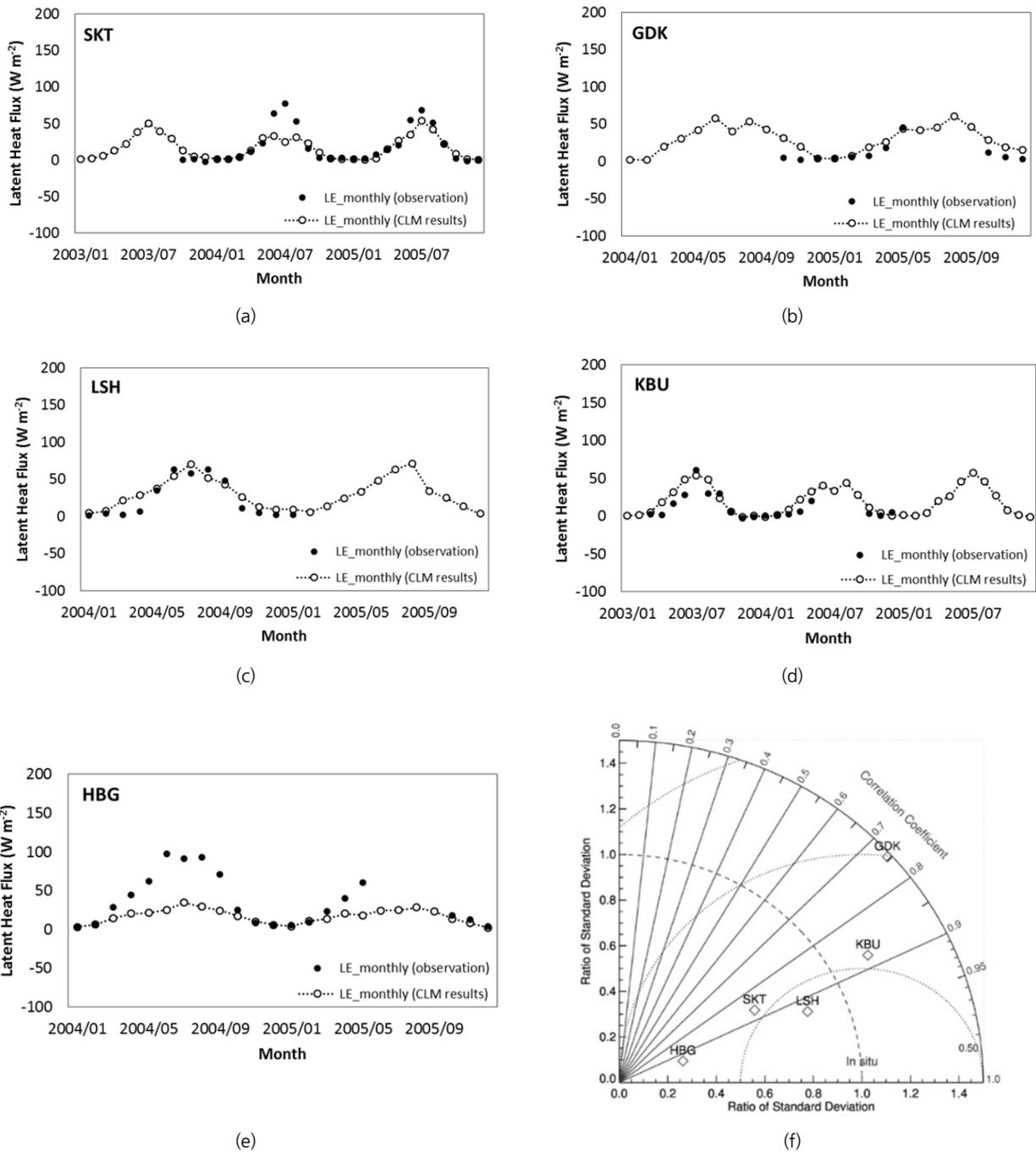


Fig. 4. Observed and estimated latent heat flux using CLM at (a) SKT, (b) GDK, (c) LSH, (d) KBU, (e) HBG and (f) Taylor diagram of sensible heat flux simulation data

**4.2 RCP 시나리오를 통한 미래 수문인자 변화 모의**

앞서 2005년까지의 CLM 모의 결과와 플렉스타워 관측 데이터를 비교하여 신뢰성 검증을 실시하였다. 이를 토대로 RCP 시나리오와 CLM을 활용하여 아시아 지역에 대하여 미래 기간 주요 에너지 인자 모의를 실시하였다. 1951년부터

2004년은 과거 기간 모의로 이 기간 태양 복사량은 태양의 활동 주기, 태양 활동에 대한 과거의 기록, 태양 흑점수의 변동 등을 고려하여 계산되었다. 미래 기간인 2005년부터 2100년까지의 태양 복사량은 2005년의 태양 복사량으로부터 시작하여 11년 주기로 같은 값을 반복하여 입력하였다.

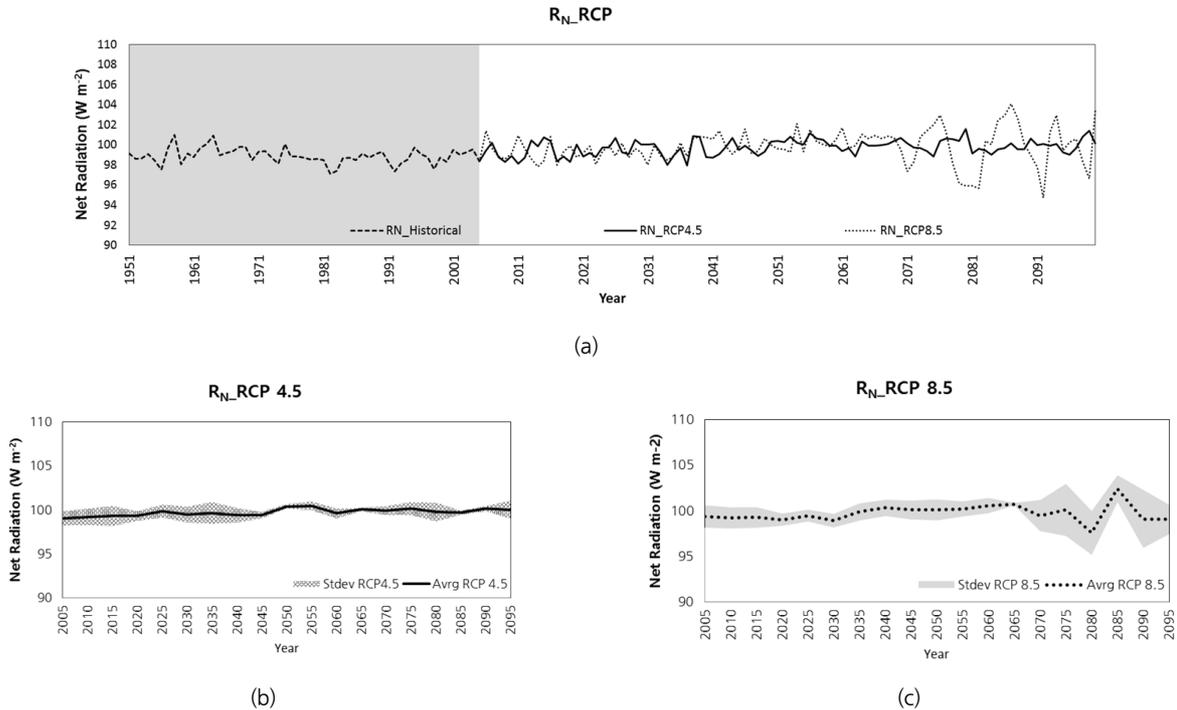


Fig. 5. (a) Estimated net radiation using RCP 4.5 and 8.5 and 5-yr averaged net radiation and standard deviation using (b) RCP4.5 and (c) RCP 8.5

4.2.1 RCP 시나리오를 통한 순복사량 변화 모의

Fig. 5(a)는 1951년부터 2005년까지의 RCP 시나리오 과거 기간 및 2005년부터 2100년까지의 미래 기간 순복사량 모의이다. RCP 4.5 및 8.5를 활용한 모의 모두 특별한 증감양상 없이 미세한 증가세를 나타냈다. 다만 RCP 8.5 모의의 경우, 2060년대 후반부터 변동성이 급격히 커지는데, 약 8년간  $6 \text{ W m}^{-2}$  만큼 감소했다가, 6년 만에  $8 \text{ W m}^{-2}$  증가한 이후, 다시 8년 만에  $10 \text{ W m}^{-2}$  감소하는 등의 경향을 보이며 (Fig. 5), 이를 계속 반복하며 매우 불안정한 상태가 지속되는 것으로 나타났다. RCP 8.5 모의의 결과의 경우 RCP 4.5 모의 결과에 비하여 에너지수지 증가폭이 상대적으로 큰데, 2060년대 초반까지는 지구-대기 시스템의 회복탄력성에 의하여 그 영향이 미미하다가, 60년대 후반부터 회복탄력성이 깨지게 되면서 순복사량의 급격한 변동이 나타나는 것으로 보인다 (Fig. 5 (a)).

Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)는 각각 RCP 4.5 및 RCP 8.5의 미래기간 순복사량 모의결과를 5년 단위로 구간을 나눠 각 구간의 평균값과 표준편차를 나타낸 그래프로, 장기적인 증감양상을 보기 쉽게 나타낸 것이다. RCP 4.5 모의의 경우 평균값이 거의 일정하며 표준편차 역시 크지 않은데 (Fig. 5(b)), 향후 100여년간 순복사량의 큰 변화가 없음을 알 수 있다. RCP 8.5 모의의 경우 앞서의 결과와 마찬가지로 70년대부터 순복사

량 평균값의 증감을 반복한다. 약 75년 까지 증감폭이 작게 나타나는 것은 70년대 중반까지 비교적 큰 폭의 증가와 감소를 반복하기는 하나 주기가 짧았기 때문인데 5년 단위의 평균값에는 잘 나타나지 않다가 70년대 중반 이후 그 주기와 폭이 점점 커지며 5년 단위의 평균값에도 영향을 주기 시작한다. 이는 70년대 초반부터 커지기 시작한 표준편차 밴드를 통해서도 알 수 있다.

RCP 시나리오를 활용한 선행 연구들 중 본 연구와 동일한 결과를 도출한 사례를 찾을 수 있다. Hong et al. (2013)은 동북아시아 지역에 대하여 RCP 4.5와 8.5 시나리오 및 RegCM4를 활용하여 미래 기간에 대한 모의 (2031-2050)를 실시하였는데, RCP 4.5를 활용한 모의의 경우 연 평균 기온이  $1.86\text{K}$ , RCP 8.5를 활용한 모의의 경우  $1.93\text{K}$  상승하는 것으로 나타났으며 이는 유의수준 1%에서 유의하게 나타났다. 일조시간, 순복사량, 평균 기온간 양의 상관관계가 있다는 Lee et al. (1995)의 연구결과를 참조한다면 Hong et al. 의 연구는 본 연구에서 나타난 RCP 4.5 및 8.5 시나리오를 활용한 모의 모두에서 순복사량이 미세하게 증가한다는 결과와 동일하다 할 수 있으며, 연평균 기온의 상승폭이 RCP 4.5 시나리오보다 8.5를 활용한 모의모의에서 다소 높게 나타나는 것 역시 본 연구의 결과와 일치한다. Oh et al. (2013) 역시 Hong et al. (2013)의 연구와

동일한 방법으로 남한에서의 미래기간 모의를 실시하였는데, RCP 4.5와 8.5를 활용한 모의 모두 연평균 기온이 1.5K 증가하는 것으로 나타났다. 계절별로 살펴보면 봄, 여름, 가을에 RCP 8.5 모의 결과의 연평균 기온 상승폭이 RCP 4.5 시나리오 모의 결과의 상승폭보다 크며, 겨울에만 RCP 4.5와 8.5 모의에서 각각 1.59K, 1.38K 증가하는 것으로 나타나 결과적으로 두 시나리오를 활용한 모의에서 연평균 기온 상승폭이 같게 나타났으며, 이는 유의수준 1%에서 유의한 결과이다. Hong과 Oh의 결과 모두 2050년까지를 대상으로 모의하였는데, 이 기간동안 각 RCP 시나리오 모의 결과의 연평균 기온의 상승폭이 큰 차이를 보이지 않는다는 것 역시 본 연구의 결과와 일치한다. 이러한 대기 온도의 증가는 탄소수지 증가로 설명될 수 있다. Heo et al. (2015)은 HadGEM-CC 모델의 RCP 시나리오에 따른 전지구 탄소수지 변화를 모의하였는데, 2000-2100년까지 이르는 기간 전반에 걸쳐 전지구 탄소수지가 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 2000년대 중반에 가장 큰 기울기를 보인다고 하였다. 21세기 중반 이후 육상 및 해양 탄소 흡수량이 감소하며 대기 중 탄소 농도가 가장 큰 상태가 되는데, 이러한 대기 중 탄소 농도의 증가가 온실효과의 극대화로 이어지고, 이로 인하여 대기 온도 또한 가장 높게 나타나는 것으로 보인다. 다만 본 연구 결과의 2060년대 이후 RCP

8.5 시나리오 모의결과는 순복사량의 증가와 함께 매우 큰 변동성을 보이는데, 이에 대하여는 추후 다시 연구할 필요성이 있다. 또한 미래기후에 대한 연구는 활용한 GCM 혹은 RCM에 따라 결과가 변할 수 있으므로, 본 연구에서 사용된 RCP 자료의 RCM과 동일한 HadGEM3-RA를 활용한 연구와의 비교 및 검증이 필요하다.

4.2.2 RCP 시나리오를 통한 현열 변화 모의

Fig. 6(a)는 1951년부터 2005년까지의 RCP 시나리오 과거 기간 및 2005년부터 2100년까지의 미래 기간 현열 모의이다. 이 중 과거 기간 동안, 현열은 뚜렷한 증감 양상 없이 다소간의 변동만을 나타냈다 (Fig. 6(a)). 2005년부터 2100년까지의 미래 기간 모의에서는 현열은 RCP 4.5를 활용한 모의의 경우 미세한 감소세를 나타냈으며, RCP 8.5를 활용한 결과에서는 전체적으로 뚜렷한 감소세를 나타냈다. RCP 8.5모의의 경우 2060년대 후반 들어 감소세가 더 커지며 변동성이 매우 큰 모습을 띄게 되는데 (Fig. 6), 이는 순복사량이 2060년대 후반 들어 매우 불안정해 지면서 그 영향이 현열에 나타나는 것으로 보인다. 증가와 감소를 반복하는 변동폭과 변동 시기 모두 순복사량의 불안정한 변동과 일치한다.

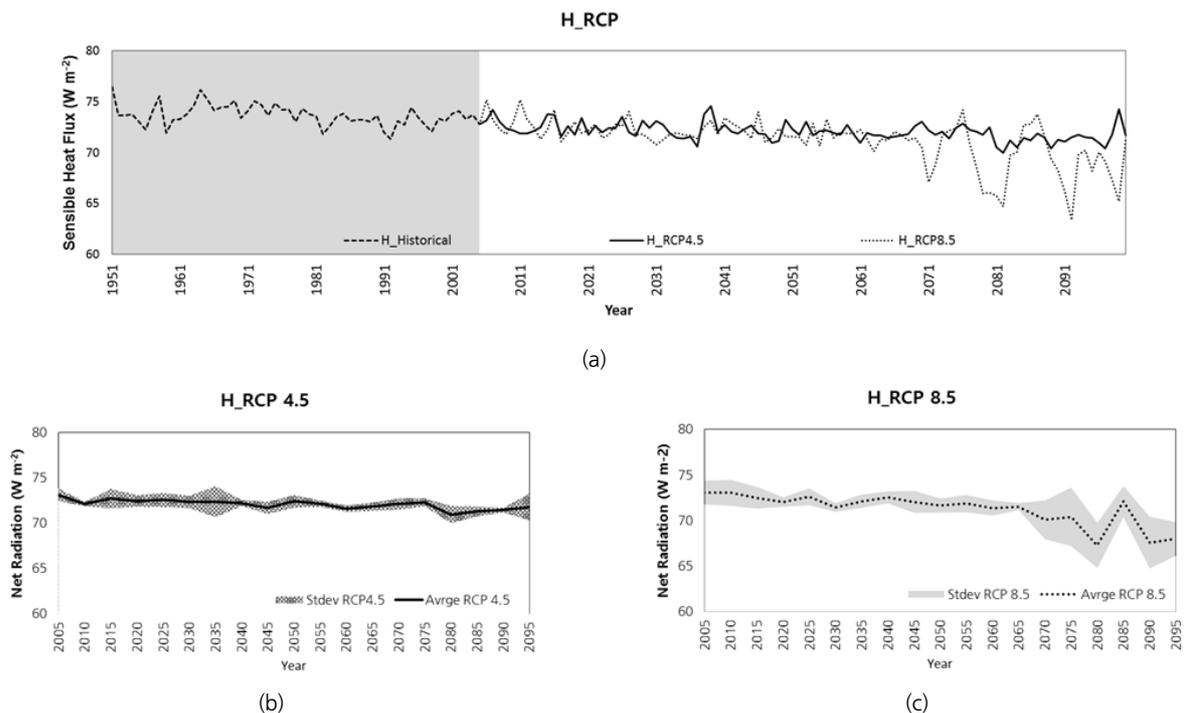


Fig. 6. (a) Estimated sensible heat flux using RCP 4.5 and 8.5 and 5-yr averaged sensible heat flux and standard deviation using (b) RCP4.5 and (c) RCP 8.5

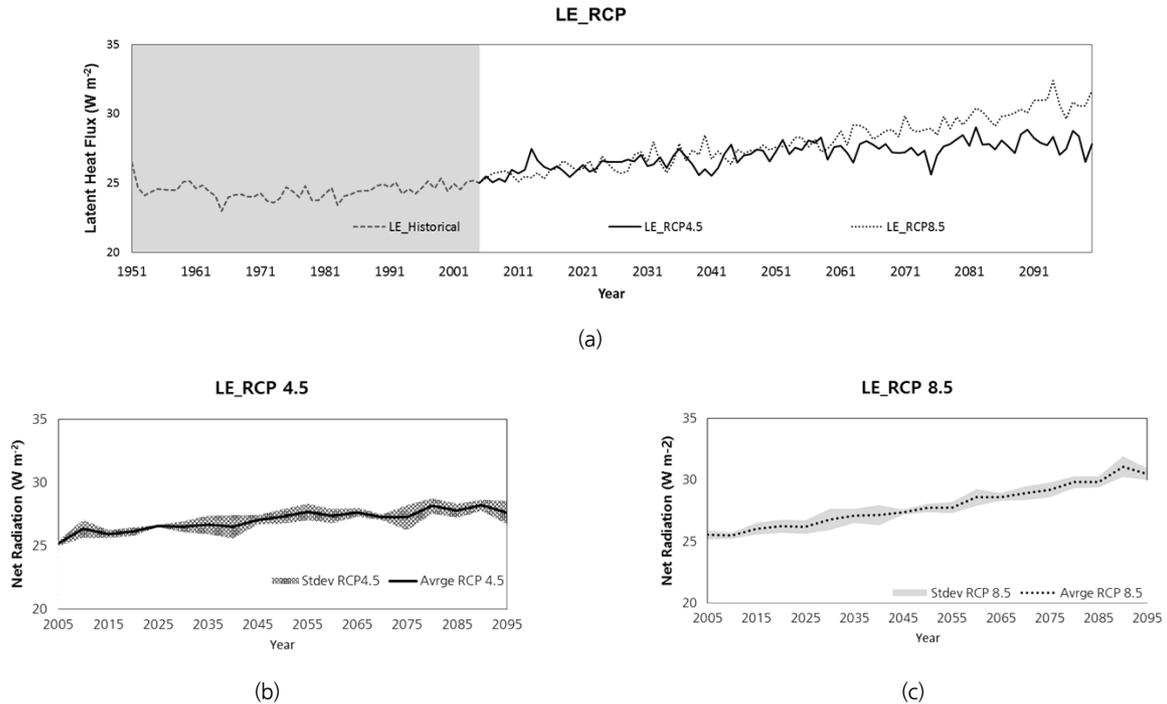


Fig. 7. (a) Estimated sensible heat flux using RCP 4.5 and 8.5 and 5-yr averaged sensible heat flux and standard deviation using (b) RCP4.5 and (c) RCP 8.5

앞서 순복사량과 마찬가지로 미래기간 현열 모의 결과를 5년 단위로 나누어 Fig. 6(b) 및 Fig. 6(c)로 나타냈다. RCP 4.5의 경우 전반적으로 감소하는 경향을 나타내며 (Fig. 6(b)), RCP 8.5 모의의 경우 RCP 4.5를 활용한 결과보다 큰 기울기를 나타내며 감소하는 것으로 나타났다 (Fig. 6(c)). 특히 순복사량의 급격한 변동이 시작되는 70년대부터 현열 역시 변동성이 매우 큰 상태가 되는데, 순복사량이 거의 일정하거나 혹은 미세 증가 양상을 나타내는 것과 달리 한 번의 상승(2085년경) 외에는 뚜렷한 감소양상을 나타낸다.

지표열 플럭스가 현열과 잠열에 비하여 상대적으로 그 크기가 작을 경우 그 값을 무시하고 순복사량이 현열 및 잠열의 합과 동일하다고 가정하게 되는데, 이 경우 순복사량이 같은 값일 경우 잠열과 현열은 음의 상관관계가 있는 것으로 이해할 수 있다. 본 연구에서 모의된 현열이 감소하는 현상은 이러한 이해에서 설명될 수 있다. 순복사량이 미세하게 증가하였지만 (Fig. 6), 4.2.3에서 설명할 잠열의 증가량 (Fig. 7)에 훨씬 못 미치는 상승폭이고, 따라서 이것이 현열의 감소로 이어지는 것으로 보인다.

#### 4.2.3 RCP 시나리오를 통한 잠열 변화 모의

Fig. 7(a)은 1951년부터 2005년까지의 RCP 시나리오 과거

기간 및 2005년부터 2100년까지의 미래 기간 잠열 모의이다. 잠열 역시 현열과 마찬가지로 과거간 모의에서는 큰 변동성을 보이지 않았다. 2005년부터 RCP 4.5 및 8.5 모의 결과 모두 잠열이 증가하는데, 선형 추세선을 통하여 그 증가세를 살펴보면 2005년까지의 과거 기간 모의에서는 0.005의 기울기를 보이다가, 미래 기간부터 RCP 4.5 모의의 경우 0.25, RCP 8.5 모의의 경우 0.6에 가까운 기울기 (0.598)를 나타냈다 (Fig. 7(a)). 잠열의 경우 순복사량 및 현열과는 달리 확연한 증가세를 나타냈는데, 이는 RCP 4.5 시나리오보다 약 1.7% 가량 높은 RCP 8.5 시나리오의 복사 강제력 (기상청, 기후변화 정보센터, <http://www.climate.go.kr>)으로 인해 증발산 역시 증가했기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 7(b) 및 Fig. 7(c)는 미래기간 잠열 모의결과를 5년 단위로 나눠 매 5년마다의 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다. RCP 4.5 및 RCP 8.5를 활용한 모의 모두 증가하는 양상을 나타냈으며 그 기울기는 RCP 8.5 모의의 경우가 훨씬 큰 것으로 나타났다. 앞서 살펴본 순복사량 및 현열의 미래기간 모의 결과와 달리 표준편차 밴드가 좁은 것을 확인할 수 있으며, 2100년까지 큰 변동 없이 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다.

RCP 시나리오 및 HadGEM3-RA를 활용(본 연구와 동일)한 선행연구들 중에서 본 연구의 결과와 비슷한 결과들을 찾

을 수 있다. Park et al. (2014)은 HadGEM3-RA로 생성된 RCP 시나리오 데이터를 강제입력자료로 하여 SWAT모형을 구동, 용담댐 유역의 미래 기간 모의를 실시하였다. RCP 4.5 시나리오를 활용하여 모의하였을 때 증발산량은 baseline (1982-2011) 대비 2040년대 4%, 2080년대 7.1% 상승하는 것으로 나타났으며, RCP 8.5 시나리오를 활용한 모의의 경우 동일한 baseline 대비 2040년대 5%, 2080년대 11.8% 상승하는 것으로 나타났다. Jang et al. (2015)은 Park et al. (2014)과 동일한 방법으로 임하댐 유역에 대하여 baseline 기간만을 변화시켜 (1980-2013) 연구를 진행하였는데, RCP 4.5 모의의 경우 baseline 대비 2040년대 3.3%, 2080년대 6.4% 증가하는 것으로 나타났으며, RCP 8.5 모의의 경우 baseline 대비 2040년대 7.8%, 2080년대 11.2% 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 증발산량(잠열)의 증가는 온도 상승과 관련이 있는 것으로 보인다. 앞서 순복사량 모의에서 언급한 대로 Hong et al. (2013)과 Oh et al. (2013)의 연구 결과는 미래 아시아 지역 온도가 상승한다고 예측했으며, Allen et al. (2003)은 온도가 높을수록 실제 증발산량이 증가한다는 결과를 얻었다. 온도의 상승으로 인하여 증발산량(잠열)이 증가했다고 볼 수 있다. 증발산량 증가의 또 다른 원인으로 강수량의 증가를 꼽을 수도 있다. Kim et al. (2013)은 HadGEM2-AO 모델을 활용, RCP 4.5 및 8.5 시나리오에 따른 미래 기간 모의를 실시하였는데, 시나리오마다 차이는 있지만 2.4~4.7%까지 강수량이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 아시아 지역은 대부분의 지역에서 증가하는 것으로 나타났다. Nagler et al. (2007)은 증발산량과 강수량 사이에 양의 상관관계가 있음을 밝혔는데, 이를 Kim et al. (2013)의 연구와 연관 지어 생각해보면 강수량의 증가가 증발산량 증가로 이어진 것으로 볼 수 있다. 다만, 앞서 언급한 대로 다른 GCM 혹은 RCM을 이용할 경우 본 연구에서 나타난 것과 다른 결과가 나타날 수 있다.

## 5. 토의 및 결론

본 연구에서는 RCP historical, RCP 4.5, RCP 8.5 자료를 CLM의 강제입력자료로 활용하여 주요 에너지 인자인 순복사량, 현열, 잠열을 모의하였다. 과거 자료를 활용한 모의 (1951년부터 2004년까지)에서는 2003년부터 2005년까지 2개년 혹은 3개년의 AsiaFlux 5개 지점의 순복사량, 현열 및 잠열 관측치와 CLM 모의 결과 비교를 수행하였다. 이에 대한 통계적 수치는 Taylor 다이어그램으로 나타내었으며, 통계 분석을 통하여 CLM과 시나리오 자료의 신뢰성을 검증하

였다. 통계 분석에서 모의된 인자 중 순복사량이 가장 잘 모의된 것으로 나타났으며, 이어 현열, 잠열 순으로 나타났다.

과거 순복사량은 미세한 감소세에 있다가 미래 기간 모의부터 약간의 증가 경향성을 보였다. 다만 RCP 8.5를 활용한 모의 결과에서 2060년대 후반부터 매우 큰 폭으로 증가와 감소를 반복한다. 이는 지구-대기 시스템의 회복탄력성이 깨지며 일어나는 현상으로 보인다. 현열은 일정 수준 감소세에 있던 현재의 추세에 이어 RCP 4.5 및 8.5를 활용한 모의 결과 모두 꾸준히 감소하다, RCP 8.5 모의 결과에서는 2060년대 후반 들어 감소세가 커지며 변동성 역시 매우 커지는 것을 확인할 수 있는데, 60년대 후반 순복사량의 변동에 영향을 받는 것으로 보인다. 잠열은 미세한 증가세에 있던 현재의 추세에서 RCP 4.5 및 8.5 모의 결과 모두 증가 경향성이 커지는 것으로 보이며, 그 증가 폭은 RCP 8.5 모의에서 훨씬 큰 것으로 나타났다.

다만 미래기후에 대한 연구는 그 자체로 상당한 불확실성을 포함하는 것으로 알려져 있다. Anav et al. (2013)은 미래기후 연구는 모델과, 변수 선택에 따라 그 결과가 상당히 달라질 수 있다고 언급하였다. 본 연구 역시 GCM 혹은 RCM 선택에 따라 또 변수 선택에 따라 그 결과에 상당한 차이가 생길 수 있다. 추후 다른 모델로 생성된 강제입력자료를 활용한 연구가 있어야 할 것이며, 변수 선택 또한 다양화하여 보다 심층적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2014M1A3A3A02034789).

## References

- Allen, L. H., Pan, D., Boote, K. J., Pickering, N. B., & Jones, J. W. (2003). "Carbon dioxide and temperature effects on evapotranspiration and water use efficiency of soybean." *Agronomy Journal*, Vol. 95 No. 4, pp. 1071-1081.
- An, J. H., Yu, C. S., & Yun, Y. N. (2001). "An analysis of hydrologic changes in Daechung dam basin using GCM simulation results due to global warming." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34 No. 4, pp. 335-345.
- Anav, A., Friedlingstein, P., Kidston, M., Bopp, L., Ciais, P., Cox, P., ... & Zhu, Z. (2013). "Evaluating the land and

- ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 Earth System Models." *Journal of Climate*, Vol. 26(18), 6801-6843.
- Choi, M.H., Lee, S.O., and Kwon, H.J. (2010). "Understanding of the Common Land Model performance for water and energy fluxes in a farmland during the growing season in Korea." *Hydrological processes*, Vol. 24, No. 8, pp. 1063-1071.
- Dai, Y., Zeng, X., Dickinson, R. E., Baker, I., Bonan, G. B., Bosilovich, M. G., ... and Yang, Z. L. (2003). "The Common Land Model." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 84, No. 8, pp. 1013-1023.
- Heo, T.K., Boo, K.O., Shim, S.B., Hong, J.K., and Hong, J.W. (2015). "Global carbon budget changes under RCP scenarios in HadGEM2-CC." *Atmosphere*, Vol. 25 No. 1, pp. 85-97.
- Hong, S. Y., Oh, S. K., Suh, M. S., Lee, D. K., Ahn, J. B., & Kang, H. S. (2013). "Future climate changes over North-East Asian region simulated by RegCM4 based on the RCP scenarios." *Journal of Climate Research*, Vol. 8, pp. 27-44.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). "Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
- Jang, E.S., Moon, H.W., Hwang, S.H., and Choi, M.H. (2013). "Estimation of surface fluxes using Noah LSM and assessment of the applicability in Korean peninsula." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 509-518.
- Jang, S.S., Ahn, S.R., Joh, H.K., and Kim, S.J. (2015). "Assessment of climate change impact on Imha-dam watershed hydrologic cycle under RCP scenarios." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 18 No. 1, pp. 157-170.
- Kim, D., Lim, Y. J., Lee, S. O., & Choi, M. (2011). "Validation of energy and water fluxes using Korea Land Data Assimilation and flux tower measurement: Haenam KoFlux site's hydro-environment analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 3B, pp. 285-291.
- Kim, M.H., Kang, H.S., Lee, J.H., Baek, H.J., and Cho, C.H. (2013). "Estimates of the water cycle and river discharge change over the global land at the end of 21st century based on RCP scenarios of HadGEM2-AO climate model." *Atmosphere*, Vol. 23 No. 4, pp. 425-441.
- Kim, Y.J. (2010). *Preliminary evaluation of the land surface model coupled to the dynamic vegetation model over East Asia*. Working Paper, No. 2010-04, Korea Environment Institute, pp. 1-35.
- Korea Meteorological Administration. Climate Change Information Center <http://ccs.climate.go.kr/index.html>
- Lee, J. S. (2006). *Hydrology*, Goomibook, pp. 41
- Lee, J. T., Yun, S. H., & Park, M. E. (1995). "Relationships between seasonal duration of sunshine and air temperature in Korea." *Korean Journal of Environmental Agriculture*. Vol. 14, No. 2, pp. 155-162.
- Nagler, P. L., Glenn, E. P., Kim, H., Emmerich, W., Scott, R. L., Huxman, T. E., & Huete, A. R. (2007). "Relationship between evapotranspiration and precipitation pulses in a semiarid rangeland estimated by moisture flux towers and MODIS vegetation indices." *Journal of Arid Environments*, Vol. 70 No. 3, pp. 443-462.
- Oh, S. G., Suh, M. S., Myoung, J. S., & Cha, D. H. (2011a). "Impact of boundary conditions and cumulus parameterization schemes on regional climate simulation over South-Korea in the CORDEX-East Asia domain using the RegCM4 model." *Journal of the Korean earth science society*, Vol. 32 No. 4, pp. 373-387.
- Oh, S. G., Suh, M. S., Cha, D. H., & Choi, S. J. (2011b). "Simulation skills of RegCM4 for regional climate over CORDEX East Asia driven by HadGEM2-AO." *Journal of the Korean earth science society*, Vol. 32 No. 7, pp. 732-749.
- Oh, S. G., and Suh, M. S. (2013). "Projection of fine-scale climate changes over South Korea based on the RCP(2.6, 4.5, 6.0, 8.5) scenarios using RegCM4." *Journal of Climate Research*, Vol. 8, No. 4, pp. 291-307.
- Park, I.S., Jang, Y.W., Chung, K.W., Lee, G.W., Owen, J.S., Kwon, W.T., and Yun, W.T. (2014). "In-depth review of IPCC 5th Assessment Report." *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 30 No. 2, pp. 188-200.
- Park, J.Y., Jung, H., Jang, C.H., and Kim, S. J. (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*, Vol. 56 No. 3, pp. 19-29.
- Whitfield, B., Jacobs, J. M., & Judge, J. (2006). "Intercomparison study of the Land Surface Process Model and the Common Land Model for a prairie wetland in Florida." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, No. 6, pp. 1247-1258.
- Wiesner, C. J. (1970). *Hydrometeorology*. Chapman and Hall, London, pp. 30-31.