

## 기후 인자와 관련된 육상 탄소 순환 변동: 탄소추적시스템과 CMIP5 모델 결과 비교

선민아\* · 김영미 · 이조한 · 부경은 · 변영화 · 조천호  
국립기상과학원 기후연구과

(접수일: 2017년 5월 19일, 수정일: 2017년 7월 11일, 게재확정일: 2017년 7월 31일)

### Response of Terrestrial Carbon Cycle: Climate Variability in CarbonTracker and CMIP5 Earth System Models

Minah Sun\*, Youngmi Kim, Johan Lee, Kyoung-On Boo, Young-Hwa Byun, and Chun-Ho Cho

*Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea*

(Manuscript received 19 May 2017; revised 11 July 2017; accepted 31 July 2017)

**Abstract** This study analyzes the spatio-temporal variability of terrestrial carbon flux and the response of land carbon sink with climate factors to improve of understanding of the variability of land-atmosphere carbon exchanges accurately. The coupled carbon-climate models of CMIP5 (the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project) and CT (CarbonTracker) are used. The CMIP5 multi-model ensemble mean overestimated the NEP (Net Ecosystem Production) compares to CT and GCP (Global Carbon Project) estimates over the period 2001~2012. Variation of NEP in the CMIP5 ensemble mean is similar to CT, but a couple of models which have fire module without nitrogen cycle module strongly simulate carbon sink in the Africa, Southeast Asia, South America, and some areas of the United States. Result in comparison with climate factor, the NEP is highly affected by temperature and solar radiation in both of CT and CMIP5. Partial correlation between temperature and NEP indicates that the temperature is affecting NEP positively at higher than mid-latitudes in the Northern Hemisphere, but opposite correlation represents at other latitudes in CT and most CMIP5 models. The CMIP5 models except for few models show positive correlation with precipitation at 30°N~90°N, but higher percentage of negative correlation represented at 60°S~30°N compare to CT. For each season, the correlation between temperature (solar radiation) and NEP in the CMIP5 ensemble mean is similar to that of CT, but overestimated.

**Key words:** CarbonTracker, CMIP5, climate factor, terrestrial carbon flux

## 1. 서 론

많은 선행 연구들은 이산화탄소 증가와 기후변화로 인한 육상 탄소의 민감도를 예측하고 평가하기 위하

여 관측 값을 이용해 전지구에서 지역 규모까지 지구 시스템모델의 현재 기후 모의 능력을 평가하는 다양한 실험들을 수행하였다(Friedlingstein et al., 2006; Lin, 2007; Santer et al., 2007; Gillett et al., 2008; Zickfeld et al., 2011; Arora et al., 2013; Peng et al., 2014). 육상 탄소 순환의 변동성은 기후변화와 이산화탄소 농도의 증가와 연관이 있으며 지역적으로 서로 다른 반응을 나타내왔다(Boer and Arora, 2010, 2013; Arora et al., 2013). 또한 대기 중 이산화탄소 농도의

\*Corresponding Author: Minah Sun, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6680, Fax: +82-64-738-9072  
E-mail: masun@korea.kr

증가율에 대해 짧은 주기에서 긴 주기의 변동성은 기후변화에 따른 육상 생물권 흡수의 반응에 의해 지배되어 왔다(Denman et al., 2007; Shao et al., 2013). 이러한 육상 생물권의 흡수는 전지구 탄소 순환에 있어 중요한 역할을 하고 있으며 탄소를 저장하는데 큰 역할을 하고 있다.

CMIP5 (the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project; Taylor et al., 2012)에 참여한 모델들 중 탄소 순환이 결합된 모델 내에서 육상 생태계의 이산화탄소 플럭스 교환은 다양한 시·공간적 규모 내에서 큰 변동성을 보이고 있다. 육상의 이산화탄소 흡수는 기온, 강수, 토양 수분 등에 영향을 받고 이에 따라 기후변화를 야기할 수 있다고 알려져 있다(Shao et al., 2013). 이러한 요소들 중 기온과 강수 등의 기후 인자들은 대기와 육상 탄소 교환을 조정하는데 있어 직접적으로 주로 광합성과 호흡 등의 균형에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Peng et al., 2014). 이로 인해 식생 성장 기간의 시기와 길이가 조정되어 생물권과 대기 간 탄소 플럭스의 경년변동성은 큰 영향을 받는다(Law et al., 2002; Chapin III et al., 2005). 또한 육상 탄소 플럭스의 경년변동성은 지역 규모 내에서 물리적 변수들의 변화에 의한 열과, 가뭄과 같은 극한 현상에 대해서도 민감하게 반응하였다(Potter et al., 2003; Zeng et al., 2005; Zhao and Running, 2010). 하지만 대부분 탄소 순환이 결합된 모델들은 대기 이산화탄소 농도의 증가나 기후변화의 영향으로 인한 전지구 육상 탄소 흡수의 민감한 반응을 지역별로 나타내는데 어려움이 있다. 또한 육상 생물권과 대기 간 탄소 플럭스 교환 변화의 규모와 공간적 패턴에 많은 불확실성과 민감성을 가지고 있다(Zeng et al., 2005; Friedlingstein et al., 2006; Denman et al., 2007; Booth and Jones, 2011; Peng and Dan, 2015).

지난 몇 십 년 동안 전지구 규모에서부터 국지 규모까지 육상 탄소 순환의 메커니즘을 이해하기 위한 목적으로 다양한 탄소 순환 모델들을 이용하여 대기와 육상의 탄소 교환 등의 과정들을 개발하고 분석하는데 많은 노력을 기울여 왔다(Moorcroft, 2006; Piao et al., 2013). 이러한 연구와 개선의 일환으로 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하의 ESRL (Earth System Research Laboratory)에서는 탄소추적시스템(CarbonTracker, CT)을 개발하였고(Peters et al., 2005), 북미 지역에 대해 탄소추적시스템 산출 값과 실제 관측 값을 비교하여 분석한 바 있다(Peters et al., 2007). 탄소추적시스템은 앙상블 칼만 필터를 기반으로 한 역분석 시스템으로써 이산화탄소 관측 값을 이용하여 고해상도의 지표 플럭스를 추정해 낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 탄소추적

시스템으로 산출한 값은 여러 선행 연구들을 통해 위성과 지상 관측 자료뿐만 아니라 항공 관측 자료의 비교검증 시 사용된 바 있다(Basu et al., 2011; Schneising et al., 2014; Kulawik et al., 2016; Zeng et al., 2017). 지구시스템모델의 육상 탄소 민감도를 분석하고 비교하는데 있어 관측 값뿐만 아니라 탄소추적시스템 결과를 이용해 볼 필요가 있다.

본 연구에서는 탄소추적시스템과 탄소 순환이 결합된 CMIP5 모델을 이용하여 육상 생물권 이산화탄소 플럭스의 시·공간적 변동성을 분석하고자 한다. 또한 기온, 강수, 일사량의 변화에 따른 육상 생태계 이산화탄소 플럭스의 반응을 보고자 하며, 이러한 결과들이 탄소추적시스템과 CMIP5에 참여한 모델들에서 어떠한 차이를 보이고 있는지 알아보고자 한다.

## 2. 모델 자료 및 분석 방법

### 2.1 탄소추적시스템

탄소추적시스템은 대기, 해양, 육상에서의 이산화탄소 배출과 흡수를 추정할 수 있는 시스템으로 지표 플럭스 과정, 수송모형, 자료동화 과정으로 구성된다. 지표 플럭스 과정은 육상 광합성, 대기와 해양간의 이산화탄소 교환, 화석연료와 산불에 의한 이산화탄소 배출의 네 가지로 구성된다. 이 과정에서 산출된 초기 플럭스는 대기 수송모형인 TM5 (Transport Model 5)에 입력하여 대기에서의 이산화탄소 농도를 모사한다(Krol et al., 2005; Huijnen et al., 2010). 이후 자료동화 과정을 통해 식생과 해양의 플럭스를 최적화하고 격자화한 플럭스와 3차원 이산화탄소 농도 분포를 산출하고 이산화탄소 순환을 실제에 가깝게 구성한다. 국립기상과학원의 탄소추적시스템은 미국 NOAA의 탄소추적시스템과 달리, 전지구  $3^{\circ} \times 2^{\circ}$ 와 아시아 지역에 대해  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  수평 해상도로 이중 격자 구조를 가지고 있다.

### 2.2 CMIP5 모델

본 연구에서는 CMIP5에 참여한 모델들 중 탄소 순환이 결합된 BCC-CSM1.1, HadGEM2-CC 등 열개의 모델 결과를 사용하였다(Table 1, IPCC, 2013). 이러한 기후 모델은 대기 중의 이산화탄소 수송 및 육지와 해양 모델에서 식생의 생지화학과정이 포함되어 있다. 연구에 사용한 기후 모델은 수평, 수직 해상도뿐만 아니라 식생 종류, 토양 성분, 인위적인 효과, 탄소 및 질소 순환, 산불 등 설정에 차이가 있다. 각 모델에서 사용한 지면 모델 또한 다르지만 육상 탄소 순환 과정의 원리는 유사하다(Shao et al., 2013).

**Table 1.** Description of CMIP5 models used in this study.

Model	Institute	Resolution	Land Carbon			Reference
			Model name	Nitrogen-cycle	Fire	
BCC-CSM1.1	BCC	2.813° × 2.813°	BCC-AVIM1.0	N	N	Wu et al. (2013)
CanESM2	CCCma	2.813° × 2.813°	CLASS	N	N	Arora et al. (2011)
CESM1-BGC	NSF-DOE-NCAR	0.9° × 1.25°	CLM4	Y	Y	Long et al. (2013)
GFDL-ESM2G	NOAA-GFDL	2° × 2.5°	LM3	N	Y	Dunne et al. (2012, 2013)
GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL	2° × 2.5°	LM3	N	Y	Dunne et al. (2012, 2013)
HadGEM2-CC	MOHC	1.25° × 1.875°	JULES	N	N	Collins et al. (2011); Jones et al. (2011)
HadCEM2-ES	MOHC	1.25° × 1.875°	JULES	N	N	Collins et al. (2011); Jones et al. (2011)
IPSL-CM5A-LR	IPSL	1.875° × 3.75°	ORCHIDEE	N	Y	Dufresne et al. (2013)
MIROC-ESM	MIROC	2.813° × 2.813°	MATSIRO	N	N	Watanabe et al. (2011); Raddatz et al. (2007)
MPI-ESM-LR	MPI-M	1.875° × 1.875°	JSBACH	N	Y	Brovkin et al. (2009); Maier-Reimer et al. (2005)

**2.3 자료 및 분석 방법**

본 연구는 순 생태계 생산량(Net Ecosystem Production, NEP) 자료를 분석에 사용하였다. 순 생태계 생산량은 대기과 육상 생물권 사이의 이산화탄소 교환량으로 탄소추적시스템의 육상 이산화탄소 플럭스 산출 결과인 순 생태계 교환량(Net Ecosystem Exchange, NEE)과 절대값은 같지만 반대 부호를 나타낸다. 따라서 탄소추적시스템의 육상 탄소 플럭스 결과는 부호만 반대로 나타내도록 계산하였다. 열 개의 CMIP5 모델들의 경우 순 일차 생산량(Net Primary Production, NPP)과 종속영양생물 호흡(Heterotrophic Respiration, HR)의 차이로 NEP 값을 계산하였다. 육상 생물권 탄소 값을 검증하기 위해 GCP (Global Carbon Project)에서 추정된 육상-대기 이산화탄소 플럭스 자료를 사용하였다(Le Quéré et al., 2015). GCP는 전지구 탄소 순환 이해를 목적으로 구축되었으며, 탄소 관측 자료와 탄소 추정모델을 이용하여 육상-대기 이산화탄소 플럭스 값을 산출한다. 기후 인자로는 기온, 강수, 일사량 자료를 사용하였으며 탄소추적시스템의 경우, 기후 인자들이 따로 결과 값으로 산출되지 않기 때문에 초기에 입력되어 들어가는 ERA-Interim의 자료를 사용하였다.

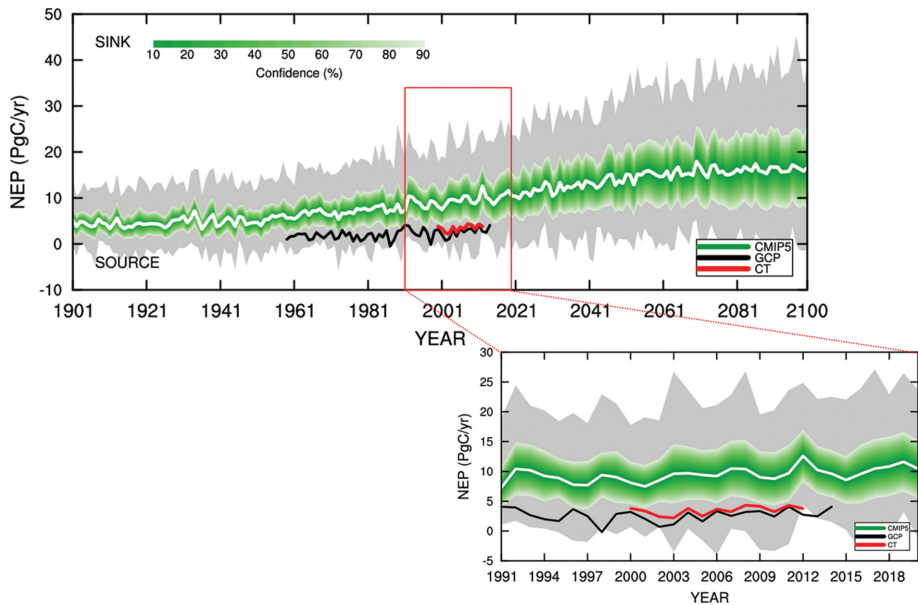
본 연구에서는 탄소추적시스템과 각 CMIP5 모델들의 결과를 비교하기 위해 CMIP5 모델 값을 1° × 1°로 내삽하여 탄소추적시스템과 동일한 해상도로 변환하였다. 분석 기간은 2001년부터 2012년까지로 월 평균 자료를 사용하였으며, CMIP5 모델은 과거 기후 모의 실험과 RCP 8.5 시나리오를 분석에 사용하였다. 또한 NEP에 대해 탄소추적시스템과 CMIP5 모델들의 시·공간적 특성을 분석하였다. 기후변동성에 따른

육상 탄소 순환의 특성을 분석하기 위해 편 상관관계 분석(Partial Correlation analysis)을 사용하였다(Baba et al., 2004). 편 상관관계 분석은 하나 또는 그 이상의 변수의 영향을 제거한 뒤 남은 두 변수의 상관성을 보는 것으로, 각 변수들의 상관관계로 계산되고 제한되는 변수의 개수에 의해 차수가 정해진다. 이는 각 변수의 의존성을 제거함으로써 두 변수의 관계를 뚜렷하게 나타낼 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 편 상관관계 분석법을 이용하여 각 기후 인자의 변동에 따라 육상 생물권 이산화탄소가 어떠한 반응을 나타내는지 분석하였다. 이러한 결과들을 각 계절별로 나누어 비교하였으며, 각 계절은 북반구를 기준으로 정의하였다. 여름철의 북반구는 6월~8월로, 남반구는 12월~2월로 정의하였으며, 겨울철의 북반구는 12월~2월, 남반구는 6월~8월로 정의하였다.

**3. 결 과**

**3.1 전지구 NEP 변동성**

탄소추적시스템과 GCP, CMIP5 모델들에 대해 시간에 따른 전지구 평균 NEP 변동성을 분석하였다(Fig. 1). 열 개의 CMIP5 모델들의 NEP 변동성에 대한 범위는 회색 음영, 다중 모델 앙상블 평균(Multiple-Model Ensemble, MME)은 흰색 실선, 이에 대한 신뢰 구간은 초록색 음영으로 나타났다. 1901년부터 2100년 동안 CMIP5 모델의 평균 탄소 흡수량은 해마다 큰 변동성을 보이면서 증가하는 경향이 있으며, 미래 모의 시간이 증가할수록 각 모델들의 탄소 흡수 모의 격차가 큰 폭으로 증가했다. GCP 추정치(검은색 실선)는 경년변동성을 보이며 50년 동안 약 5.6 PgC yr<sup>-1</sup> 증가



**Fig. 1.** Temporal evolution of global Net Ecosystem Production (NEP) from the fifth Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) models compared to the estimates from CarbonTracker (CT) and Global Carbon Project (GCP). The gray shading represents the range of variability of the 10 CMIP5 models. The green shaded area shows the confidence level using a distribution with CMIP5 ensemble mean (white line) and standard deviation.

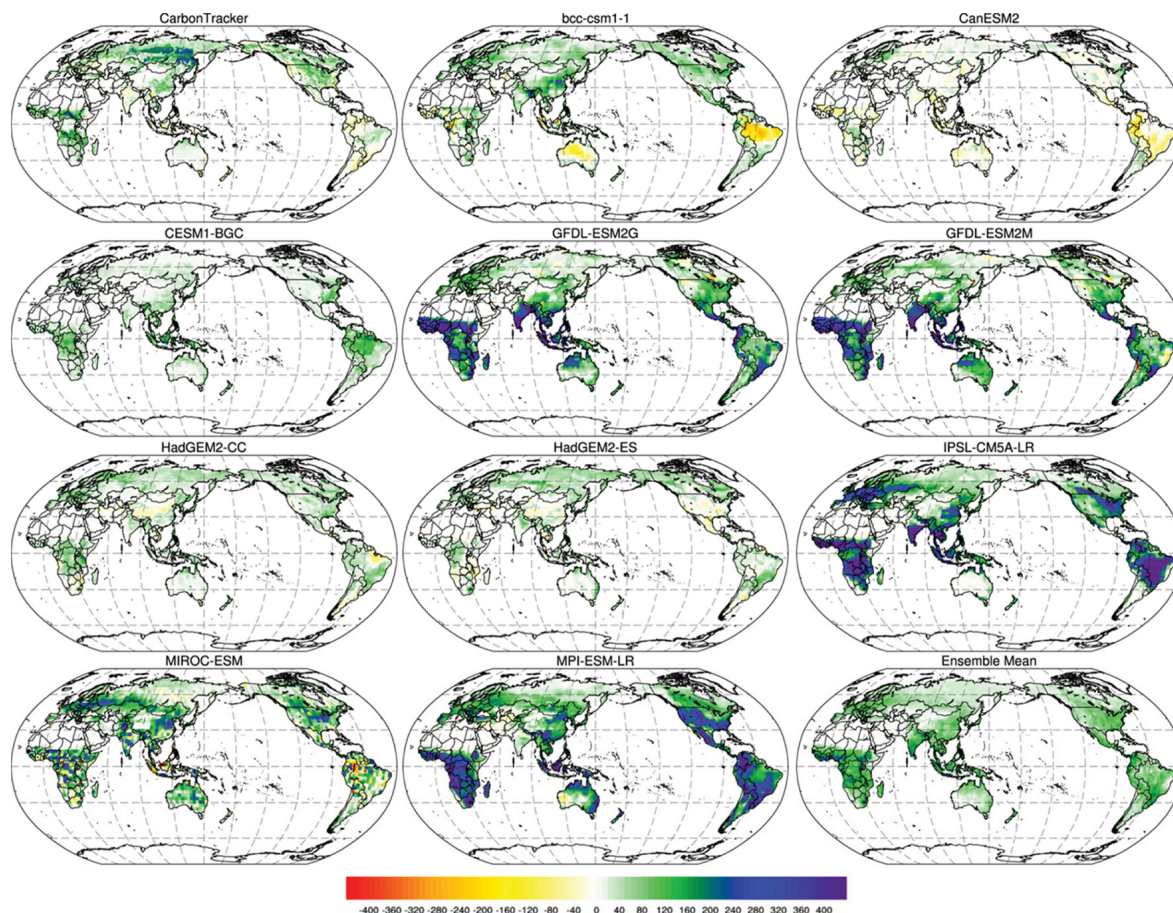
했다. 탄소추적시스템의 NEP는 GCP 추정치 보다 약간 높았으나 변화 경향이 매우 유사하며, 두 자료의 상관관계는 0.94 ( $p < 0.01$ )로 높았다. 동일 시기 기후 모델의 양상별 평균 값은 GCP 추정치에 비해  $5 \text{ PgC yr}^{-1}$  정도 높았으나 경년변화 경향은 유사했다.

CMIP5 모델들의 양상별 평균값은 탄소추적시스템과 GCP 결과에 비해 NEP를 과대 모의했다. 이는 열 개의 모델 중 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR의 모델이 탄소 흡수를 크게 모의했기 때문이다. 반면 나머지 모델들은 탄소추적시스템과 GCP의 결과에 대해 탄소 흡수의 변동성과 크기를 유사하게 모의했다(not shown).

NEP를 과대 모의하는 모델의 특성을 분석하기 위해 탄소추적시스템과 열 개의 CMIP5 모델들에 대해 연평균 NEP 분포를 나타냈다(Fig. 2). 탄소추적시스템은 북반구 중위도 이상의 대부분 지역에서 탄소의 순흡수를 나타냈다. 북위  $60^\circ$  부근에서는 북방침엽수림대(boreal forest)에서 탄소 흡수가 강했으며, 아프리카 대륙의 밀림 지역과 사바나 기후 하에 있는 지역에 대해서도 흡수가 뚜렷했다. CMIP5 모델과 양상별 평균을 탄소추적시스템의 결과와 비교했을 때, 대부분 모델에서 유라시아지역 북방침엽수림대에서의 탄소 흡수가 뚜렷하지 않았다. 이에 대해 탄소추적시스템 내 침엽수림 분포와 각 모델들의 land cover fraction

중 침엽수림 분포를 비교했을 때, HadGEM2 모형들은 유라시아지역 북방침엽수림대의 침엽수림 분포에 대한 면적 가중치가 거의 없었다. 또한 나머지 대부분 모델들은 탄소추적시스템의 침엽수림 분포만큼 식생 유형 분포를 나타내지 못했다(not shown). 이러한 각 CMIP5 모델들의 침엽수림 분포 모의 차이로 인해 탄소추적시스템에서 나타났던 유라시아지역 북방침엽수림대의 강한 탄소 흡수가 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 보인다. 또한 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR 모델들은 아프리카 대륙, 인도, 동남아시아, 남미 대륙에서 탄소 흡수를 강하게 모의했다. 이는 해당 모델들이 산불 모듈을 포함하고 있어 다른 모델들과는 다르게 흡수를 강하게 나타낸 것으로 보인다(Table 1). 이들 모델에서 산불에 의해 배출된 이산화탄소는 주로 아프리카 대륙의 중부와 중북부 지역, 호주 북부 지역, 남미 중북부 일부 지역에 많았다. IPSL-CM5A-LR 모델의 경우 해당 지역에 배출이 굉장히 컸으며, 인도를 포함한 동남아시아 지역, 미국 서부 지역에서도 이산화탄소 배출이 나타났다. MPI-ESM-LR 모델은 다른 모델들에 비해 산불에 의한 이산화탄소 배출이 크지는 않았으며, 북미와 남미 대륙 대부분과 그 중 미국 서부 지역, 남미 중북부 일부 지역에서 배출이 컸다(not shown). 모델 내에서 산불 발생 시 산불에 의해 배출된 에어로





**Fig. 2.** Global distribution of mean NEP ( $\text{gCyr}^{-1}\text{m}^{-2}$ ) from CT and 10 CMIP5 models for 12 years (2001~2012). Positive values indicate carbon uptake.

줄이 직접적으로 대기를 통한 복사의 교환에 영향을 미쳐 지표 복사를 감소시키거나(Jones et al., 2007; Jiang et al., 2016; Landry et al., 2017), 식생의 생산성과 순 생태계 탄소 흡수를 강화시키는 등 탄소 순환에도 영향을 미친다(Mahowald et al., 2011). 또한 대기 상층의 복사 강제력과 이에 따른 온도의 변화에 영향을 주게 되고 이는 대체로 토양 낙엽 등의 분해를 지체시킴으로써 육상 탄소 저장을 증가시킨다(Landry et al., 2015). 산불 모듈을 포함한 네 개 모델의 경우 산불에 의해 배출된 에어로졸의 효과와 식생의 생산성 강화로 인해 탄소 흡수를 강하게 모의한 것으로 보인다.

CESM1-BGC 모델의 경우 위의 네 개 모델들과 같이 산불 모듈을 포함하고 있지만 탄소를 강하게 흡수하지 않았다. CESM1-BGC 모델은 다른 모델들과는 다르게 질소 순환 모듈을 포함하고 있기 때문에 탄소 흡수가 강하지 않은 것으로 보인다(Table 1). 일반적

으로 지구시스템모델의 생지화학과정 내에 질소 순환이 포함되면 육상 탄소 흡수의 추정을 약화시킨다(Zaehle et al., 2010a). 또한 질소 순환의 결함으로 인해 이산화탄소의 시비효과가 감소되고 토양의 온난화로 인해 탄소가 소실되고, 특히 고위도 생태계에서 식생의 생산성이 제한 된다(Thornton et al., 2007; Sokolov et al., 2008; Zaehle et al., 2010b). 이는 CESM1-BGC 모델의 육상 모듈인 CLM이 증가하는 대기 중 이산화탄소 농도에 대해 제한된 반응으로 평균보다 낮은 육상 탄소 흡수를 모의하는 것이라고 밝힌 사전 연구와 동일한 결과이다(Gillet et al., 2013). CMIP5 모델과 탄소추적시스템의 NEP 모의 결과는 각 모델의 기후 인자들의 모의 능력 차이에 의해서도 영향을 받는다(Anav et al., 2013).

위도대별 분포에서도 이러한 특징들이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 3). 탄소추적시스템의 결과와 앙상블 평균값을 비교했을 때, 위도대별 변동성은 유사하지만 탄

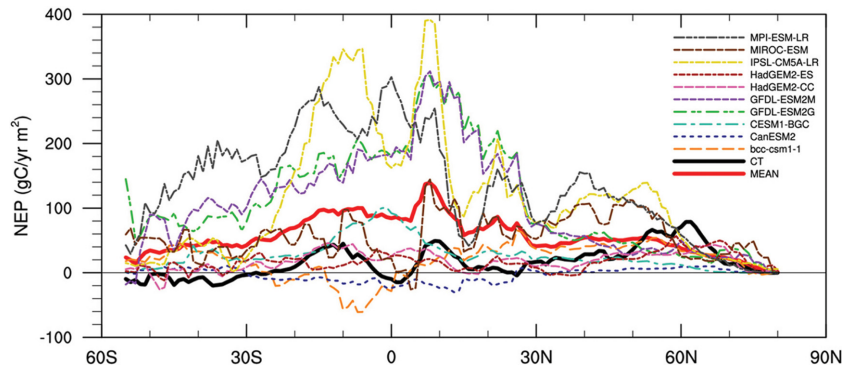


Fig. 3. The averaged zonal distribution from NEP for CT and CMIP5 models for the same period in Fig. 2.

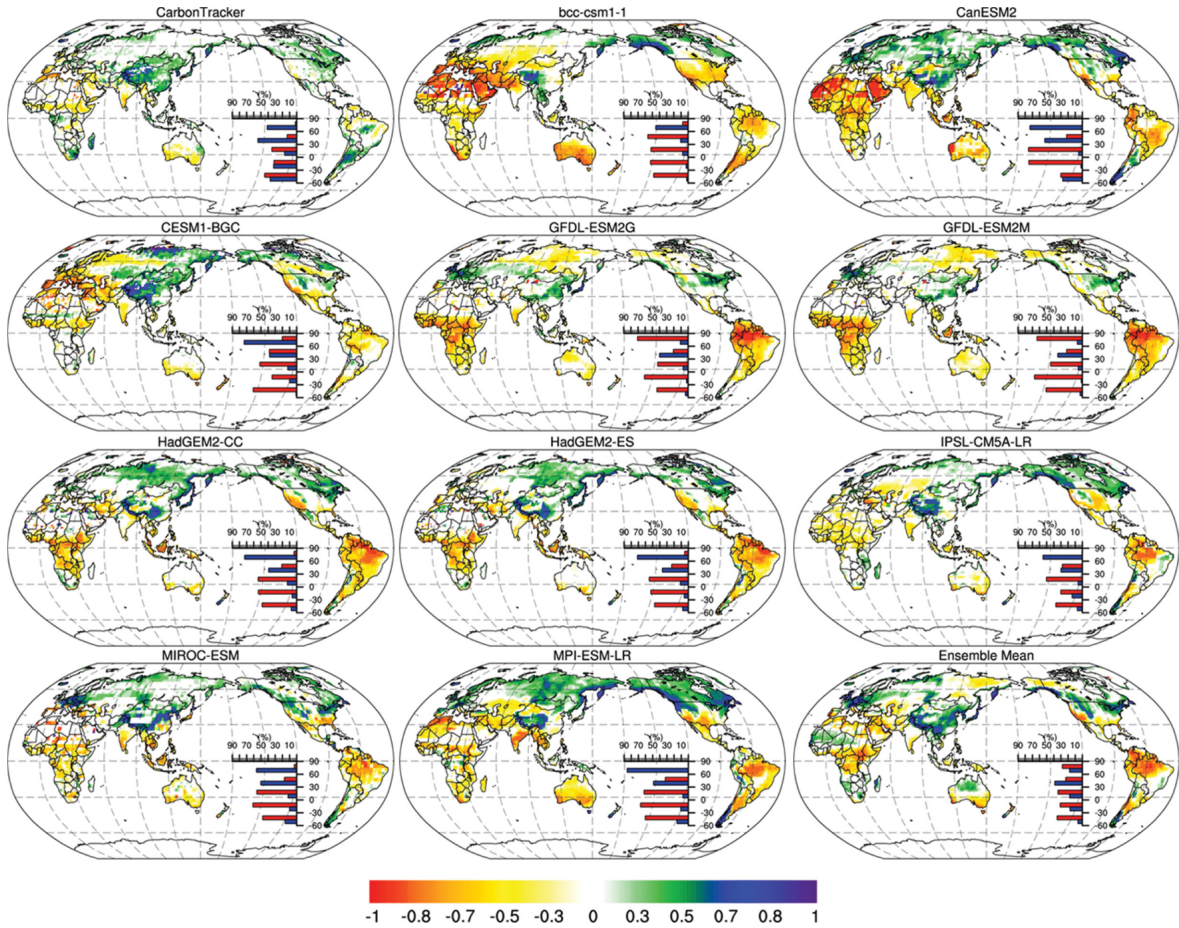


Fig. 4. Partial correlation coefficient between NEP and 2m temperatures from CT and CMIP5 models. The overlaid bar graphs show the fractional percentage (%) of positive (blue bars) and negative (red bars) correlation coefficient at 30° latitude intervals. Shadings are significant correlation coefficient at confidence level 90% using student t-test.

소 흡수를 더 강하게 모의하고 있다. 이는 흡수를 매우 강하게 모의하는 네 개의 모델들(GFDL-ESM2G,

GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR)로 인한 것으로, 나머지 모델들은 탄소추적시스템과 변동



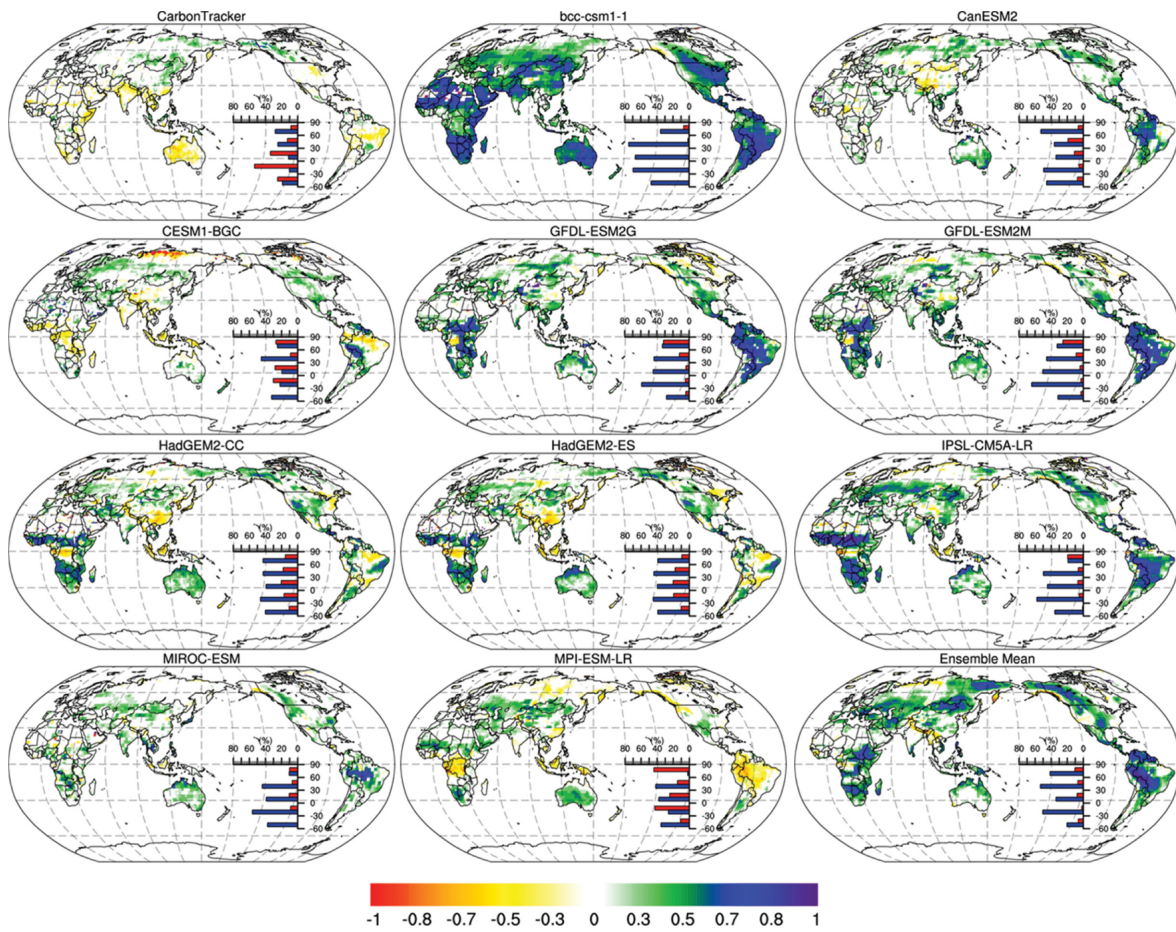


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for using precipitation.

폭이 유사했다. 하지만 모든 모델들은 북위 60° 부근에서 탄소추적시스템 결과에 비해 탄소 흡수를 낮게 모의하는 경향이 있다. 이는 각 모델들이 북반구 침엽수림 지역의 강한 탄소 흡수를 잘 모의하지 못하기 때문이다.

### 3.2 기후 인자에 따른 NEP 변화

편 상관관계 분석을 이용하여 각 CMIP5 모델들과 탄소추적시스템에서의 육상 탄소 흡수가 기온, 강수, 일사량에 의해 어떠한 반응을 나타내는지 분석하였다. NEP, 기온, 강수, 일사량은 추세를 제거 한 후 편 상관관계를 적용하였다. Figure 4는 탄소추적시스템과 CMIP5 모델들의 NEP와 2m 기온의 편 상관관계 결과로 강수와 일사량의 상관성이 제거된 결과이다. 편 상관계수들은 신뢰수준 90%에서 유의한 결과들만 나타낸 것이며, 각각 덧붙여진 그림은 위도 30° 별로 양의 상관계수와 음의 상관계수의 분포 비율을 나타낸

것이다. 탄소추적시스템의 결과에서는 북반구 중위도 이상의 대부분 지역에서 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 높았다. 특히 북아메리카 동부, 동북아시아, 노르웨이에서 기온과 NEP의 양의 상관관계가 뚜렷했다. 이는 기온이 식생 활동에 양의 영향을 미침에 따라 광합성의 증가로 인해 탄소 흡수가 증가했기 때문이다(Malhi, 2002; Kato and Tang, 2008). 북반구 고위도(60°N~90°N)에서는 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 약 40%로 높았다. 북반구 중위도에서는 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 50% 이상으로 가장 높았으나 음의 상관관계 비율이 약 20%로 나타났다. 저위도(30°S~30°N)에서는 기온과 탄소 흡수의 음의 상관관계 비율이 양의 상관관계 비율보다 높았다. 음의 상관관계 비율의 증가는 적정 수준 이상으로 기온이 증가하면 식생의 광합성량이 오히려 감소하는 특성이 반영된 결과로 보인다. 남반구 중위도(30°S~60°S) 지역에서는 기온과 NEP의 음

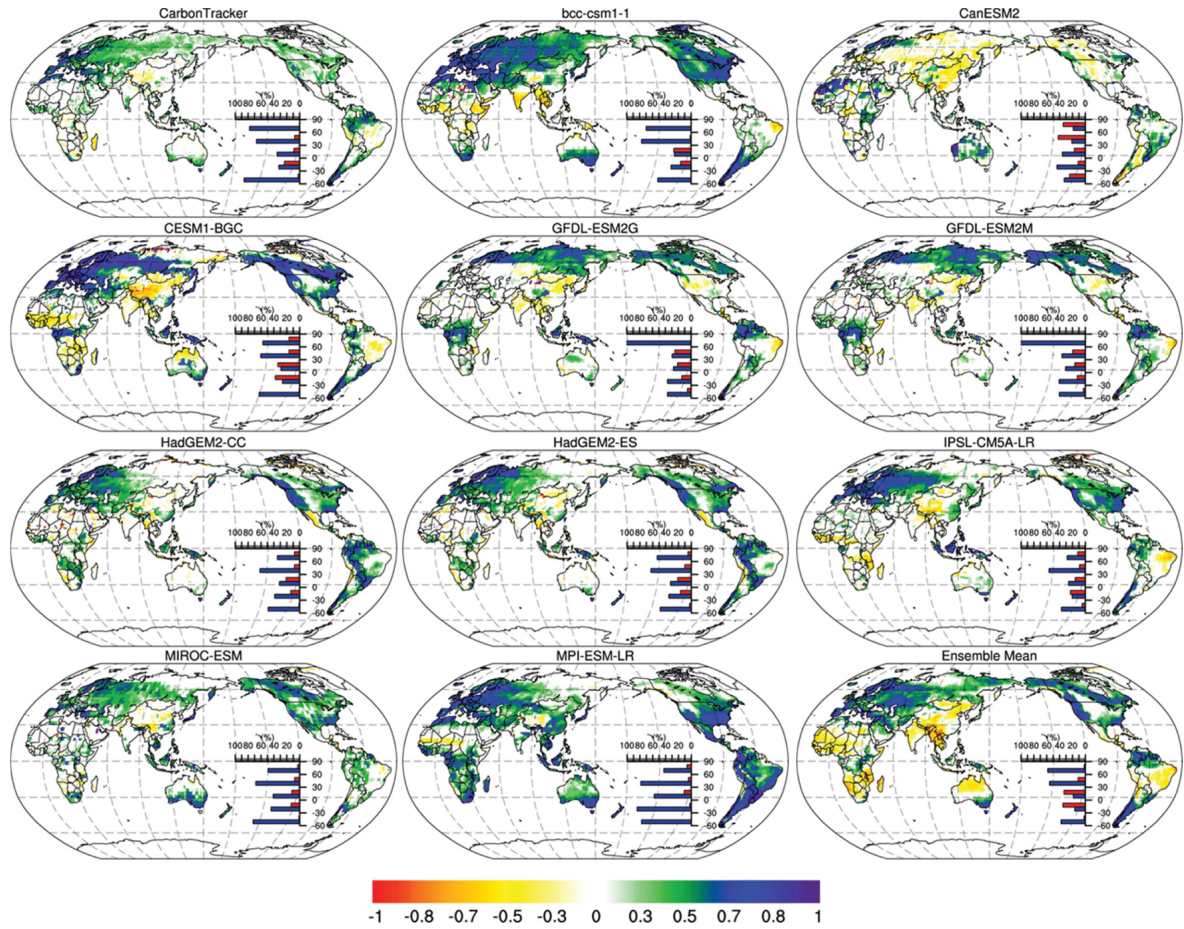


Fig. 6. Same as Fig. 4 but for using surface net solar radiation downwards.

의 상관관계 비율이 50% 정도로 양의 상관관계 비율보다 높았다. 오세아니아 지역에서는 음의 상관관계 비율이 더 컸다.

CMIP5 앙상블 평균 결과에서는 탄소추적시스템과 달리 북반구 고위도 일부 지역에서 기온과 탄소 흡수의 음의 상관관계 비율이 30% 정도로 높았다. 이는 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M 모델이 러시아 침엽수림 지대 및 알래스카 지역에서 나타난 강한 음의 상관관계의 영향으로 인한 것으로 보인다. 북반구 중위도 지역(30°N~60°N)에서는 기온과 NEP의 양의 상관관계 패턴이 탄소추적시스템과 유사했다. 북위 30° 이하의 지역에서는 기온과 탄소 흡수의 음의 상관관계가 더 우세했다. 열 개의 CMIP5 모델들의 결과에서도 탄소추적시스템 결과와 유사하게 북반구 중위도 이상의 지역에서 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 높았고, 남반구에서는 음의 상관관계 비율이 높았다. 대부분의 모델은 탄소추적시스템과 달리 아

미존 부근과 아프리카 지역에서 음의 상관관계가 나타났다. 특히 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M 모델은 남미와 아프리카 지역에서 음의 상관관계가 강했다. 동북아시아 지역은 대부분의 모델이 탄소추적시스템과 유사하게 양의 상관관계를 나타냈다. 또한 탄소추적시스템과 CMIP5 모델들의 패턴 상관관계는 신뢰수준 95%에서 모든 모델들이 유의한 결과를 나타냈다(not shown).

강수와 NEP의 편 상관관계 분석 결과는 기온과 일사량의 영향을 제한 결과로, 탄소추적시스템의 결과에서 북반구 중위도 이상의 지역에서는 강수와 NEP는 양의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 5). 하지만 북위 30° 이하의 지역에서는 음의 상관관계 비율이 더 높았다. CMIP5 앙상블 평균 결과는 북반구 중위도 이상의 지역에 대해 탄소추적시스템 결과와 유사했으나 북위 30° 이하의 지역에서는 탄소추적시스템 결과와 다르게 남반구에서 음의 상관관계 비율이 높았다. 각



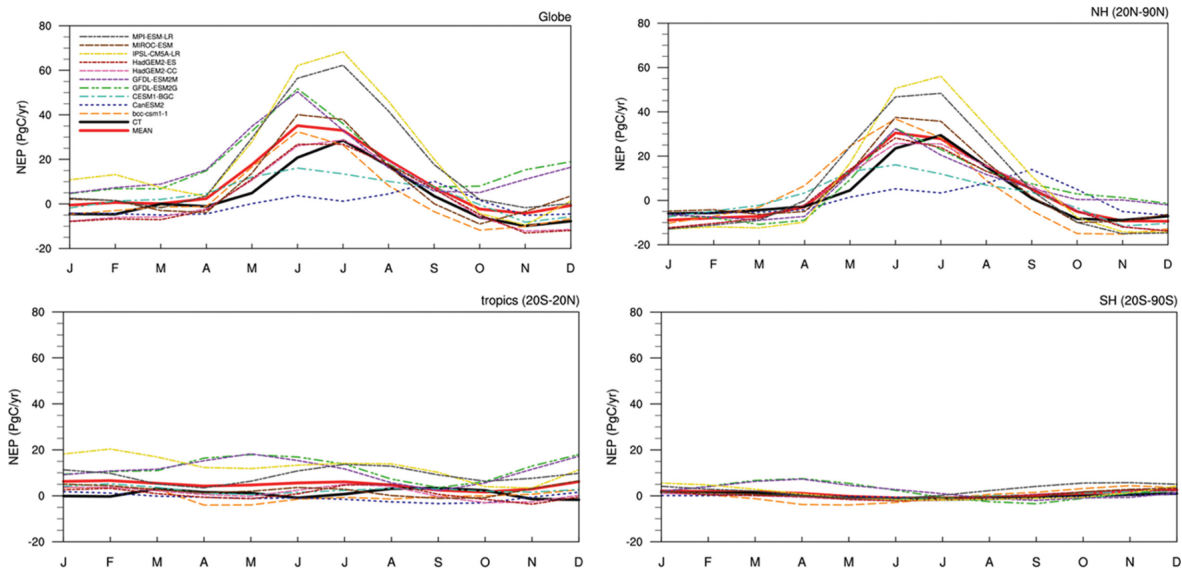


Fig. 7. Mean annual cycle of NEP for the 12 years over the global, Northern Hemisphere, tropics, and Southern Hemisphere from CT and CMIP5 models.

CMIP5 모델 결과에서도 역시 이러한 특징들이 나타났다. 이는 각 모델들의 NEP나 강수 모의 능력에 따라 나타나는 탄소 흡수의 반응 차이로 인한 것으로 보인다. 강수는 특히 열대 지방에서 기온에 비해 모델 간 변동성이 훨씬 크며 열대 지방 뿐만 아니라 대부분 위도대에서 과대 모의 한다(Shao et al., 2013). 또한 열대 지방에서 대부분의 모델들이 지역적으로 건조하거나 습한 추세를 잘 잡아내지 못하는 경향이 있다(Nasrollahi et al., 2015). 이러한 각 CMIP5 모델들의 지역별 강수 모의 능력 차이가 NEP와의 상관관계에 영향을 미치게 되고 이로 인해 관측 분석 결과에 못 미친 것으로 보인다.

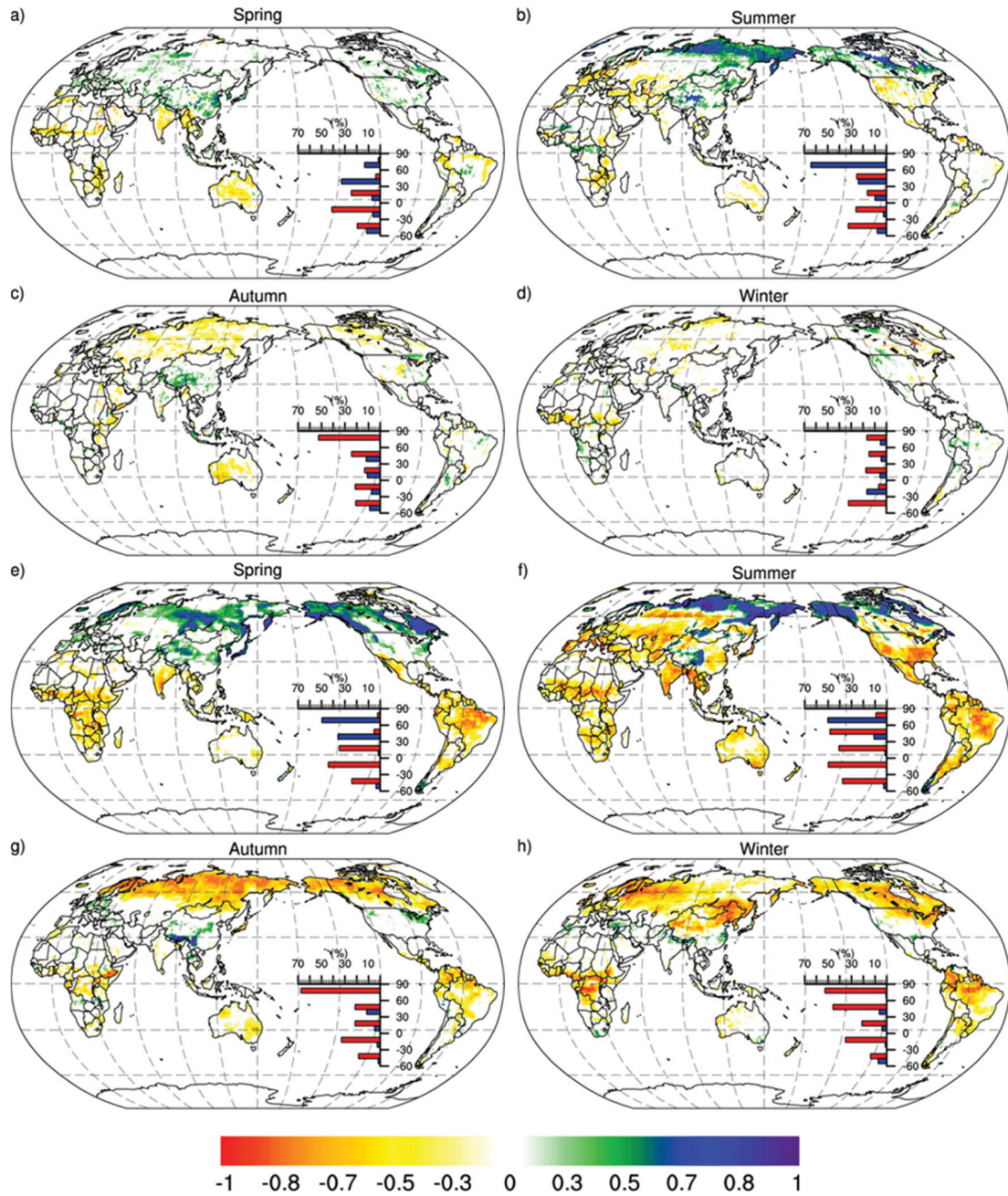
일사량은 식생의 광합성에 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 이러한 일사량과 NEP의 편 상관관계 결과는 Fig. 6과 같고 기온과 강수의 상관성은 제거되었다. 탄소추적시스템의 결과에서는 모든 위도대에서 양의 상관관계 비율이 높았다. 하지만 열대 지방에서는 양의 상관관계 비율이 다른 위도에 비해 상대적으로 낮았다. 이미 풍부한 일사량을 가지고 있는 열대 지역에서의 일사량 증가는 물 수지 변화와 총 일차 생산량(Gross Primary Production, GPP) 감소의 간접적 영향으로 식생의 광합성률이 더 이상 증가하지 않고 일정해져 탄소 흡수 증가에 미치는 영향이 적다(Beer et al., 2010).

CMIP5 앙상블 평균 결과에서는 대부분 위도대에서 일사량과 NEP는 양의 상관관계 비율이 높았지만, 지역적으로 중국, 인도, 호주 북부 등에서 음의 상관관

계 비율이 높았다. CanESM2 모형을 제외한 CMIP5 모델들은 탄소추적시스템과 마찬가지로 모든 위도대에서 양의 상관관계 비율이 높았으며, 열대 지방에서는 양의 상관관계 비율이 다른 위도대에 비해 낮았다. 다만, 대부분 모델들의 상관계수의 값이 탄소추적시스템에 비해 높았다. 탄소추적시스템의 결과와 각 CMIP5 모델들의 패턴 상관관계 분석을 했을 때, 몇몇 모델들(CanESM2, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M)을 제외하고 신뢰수준 95%에서 유의한 상관관계를 나타냈다(not shown). 그 중에서도 CESM1-BGC, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-CC 모델들은 상관관계가 높았으며 앙상블 평균의 결과 역시 상관관계가 높았다.

### 3.3 계절별 기후 인자에 따른 NEP 변화

기후 요소들은 계절에 따라 변화하며 이러한 계절적 변화는 육상 탄소 순환에 영향을 미친다. 본 절에서는 계절별로 기후 인자에 따른 NEP 변화를 분석하였다. 탄소추적시스템과 CMIP5 모델들의 전지구 평균 NEP는 계절적인 변동성이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 7). 육상 탄소 흡수는 봄철에 증가하기 시작하여 여름철에 최고치를 기록하고, 가을철에 다시 탄소 흡수가 감소하다 겨울철에 최저치를 나타냈다. 이러한 계절적 특징은 북반구(20°N~90°N)에서도 잘 드러났다. CMIP5 모델들의 앙상블 평균 결과는 탄소추적시스템과 매우 유사한 계절 변동성을 나타냈으나, CanESM2 모델은 전 위도대에서 탄소 흡수의 계절적 순환을 잘



**Fig. 8.** Partial correlation coefficient between NEP and spring, summer, autumn and, winter 2 m temperatures from CT (a-d) and multi model ensemble mean (e-h). Different months for a season have been used for each Hemisphere, and a season has been represented by the Northern Hemisphere. The overlaid bar graphs show the fractional percentage (%) distribution of positive (blue bars) and negative (red bars) correlation coefficient at 30° latitude intervals. Shadings are significant correlation coefficient at confidence level 90% using student t-test.

모의하지 못했다. 이 모델은 봄과 여름에 식생의 광합성량에 비해 호흡량이 크게 증가하고 전지구와 북

반구에서 계절적 순환을 잘 잡아내지 못한다고 선행 연구에서 밝힌 바 있다(Anav et al., 2013). GFDL-

ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR 모델은 모든 계절에 대해 탄소추적시스템보다 탄소 흡수를 과대 모의했다. 이 중 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M 모델은 남반구에서 탄소추적시스템에 비해 탄소 흡수를 높게 모의 했으며, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR 모델은 북반구와 열대 지방(20°S~20°N)에서 탄소 흡수를 높게 모의했다. 열 개의 모델들 모두 열대 지역과 남반구에서는 탄소 흡수의 계절적 변동성이 뚜렷하지 않고 일정한 범위에서 작게 변동성을 나타냈다.

탄소추적시스템과 CMIP5 모델들의 NEP 결과를 각 계절에 대해 기온, 강수, 일사량과 어떠한 관계를 가지고 있는지 알아보려고 편 상관관계 분석을 수행하였다. Figure 8은 강수와 일사량의 영향을 제한하고 NEP와 기온의 상관성을 나타낸 결과이다. 탄소추적시스템의 결과는 봄철 북반구 중위도에서 기온과 NEP가 양의 상관관계를 나타내는 지역의 비율이 30%로 겨울에 비해 높았다(Fig. 8a). 이는 기온이 상승함에 따라 식생 성장과 활동이 활발해지면서 탄소 흡수도 증가한 것으로 보인다. 여름철은 북반구 고위도 지역에서 기온이 상승함에 따라 탄소 흡수 증가 비율이 매우 높았다(Fig. 8b). 이는 여름철 기온 상승이 GDP에 큰 영향을 미치게 되어 탄소 흡수가 더욱 증가한 것으로 보인다. 가을철 북반구 대부분 지역에서 기온과 탄소 흡수는 높은 음의 상관관계 비율을 나타냈으며(Fig. 8c), 이는 가을철 기온이 주로 NPP에 음의 영향을 미치게 되어 북반구 식생의 낙엽 분해를 강화시켜 토양 호흡을 증가시켰기 때문이다(Piao et al., 2008; Xia et al., 2014). 겨울철에는 대부분 위도대에서 기온과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 낮았다(Fig. 8d).

CMIP5 모델들의 앙상블 평균 결과는 봄철 북반구 중위도 이상에서 대부분 양의 상관관계 비율이 높았다. 또한 그 이하의 지역에서는 음의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 8e). 탄소추적시스템과 마찬가지로 여름철에는 북반구 고위도 지역에 대해 양의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 8f). 하지만 가을철이 되면서 북반구 대부분 양의 상관관계 비율이 크게 감소했으며(Fig. 8g), 겨울철에는 대부분 모든 위도에서 양의 상관관계 비율이 감소했다. 탄소추적시스템 결과와 비교 했을 때, 상관계수의 값은 높았지만 기온과 탄소 흡수의 계절적 특징들이 잘 나타났다. 또한 탄소추적시스템의 결과와 패턴 상관관계를 구했을 때, 겨울철을 제외하고 나머지 계절들에 대해서는 신뢰수준 95%에서 유의한 결과를 보였다(not shown). 특히 봄철 기온과 NEP의 상관관계 결과에서는 bcc-csm1-1, CanESM2, MPI-ESM-LR 모델들이 유의한 패턴 상관관계를 나타냈다. 여름철의 경우 GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M,

MIROC-ESM 모형을 제외하고 나머지 모델들의 패턴 상관관계는 0.5 이상의 유의한 상관관계를 보였다(CanESM2, CESM1-BGC 모델은 0.4 이상). 하지만 가을철과 겨울철에서는 어떠한 모델도 탄소추적시스템의 결과와 유의한 패턴 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 각 모델들이 위도대별 기온 변화에 따른 탄소 흡수 변화 특징을 보이고는 있지만 지역별로 기온과 NEP의 반응이 강하게 나타났고 특히, 남반구에서는 대부분 모델들이 음의 상관성이 크게 나타났기 때문이다. 강수와 NEP의 상관관계는 탄소추적시스템에서 나타나는 계절적 특징들이 CMIP5 모델들의 결과에서 북반구 중위도 이상에서는 잘 나타났지만 그 이하의 지역에서는 잘 나타나지 않았다(not shown).

일사량 변화에 따른 계절별 NEP의 반응은 Fig. 9와 같다. 봄철 탄소추적시스템의 결과에서는 대부분 위도에서 양의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 9a). 여름철에는 모든 위도에서 양의 상관관계 비율이 높아졌지만 특히 북반구 중위도 이상의 지역에서 양의 상관관계 비율이 매우 높았다(Fig. 9b). 또한 열대 지역에서는 다른 위도대에 비해 상대적으로 낮은 양의 상관관계 비율이 나타났다. 가을철 역시 북위 30° 이상의 지역에서는 양의 상관관계 비율이 높았지만 열대 지역에서는 음의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 9c). 겨울철에는 대부분 위도대에서 일사량과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 높았지만, 북반구에서는 양의 상관관계 비율이 낮았다(Fig. 9d).

CMIP5 모델들의 앙상블 평균 결과에서는 봄철 북반구 중위도와 고위도에서 일사량과 탄소 흡수의 음의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 9e). 하지만 그 이외의 위도대에서는 양의 상관관계 비율이 높았다. 여름철에는 북반구 중위도 이상의 지역에서 일사량과 탄소 흡수의 양의 상관관계 비율이 크게 증가했다(Fig. 9f). 가을철에는 북반구 고위도 지역에 대해서 일사량 변화에 따른 NEP의 반응이 강하게 나타났다(Fig. 9g). 겨울철의 경우 북반구 중위도 이상의 지역에서 양의 상관관계 비율이 높았던 반면, 열대 지역에서는 음의 상관관계 비율이 높았다(Fig. 9h). 탄소추적시스템 결과에 비해 CMIP5 모델 평균 결과는 전반적으로 북반구 고위도 지역에서 일사량과 NEP의 양의 상관 효과가 강했다. 여름철 북반구 저위도와 남반구에서는 일사량 증가에 따른 탄소 흡수 증가 지역 분포가 탄소추적시스템에 비해서 높지 않지만 상관계수의 값은 높았다. 탄소추적시스템과 각 CMIP5 모델들의 패턴 상관관계 결과에서는 봄철 MPI-ESM-LR 모델 결과만 유의한 상관관계를 나타냈다( $p < 0.05$ ). 또한 가을철에는 bcc-csm1-1 모델의 결과만이 유의한 결과를 나타냈다.



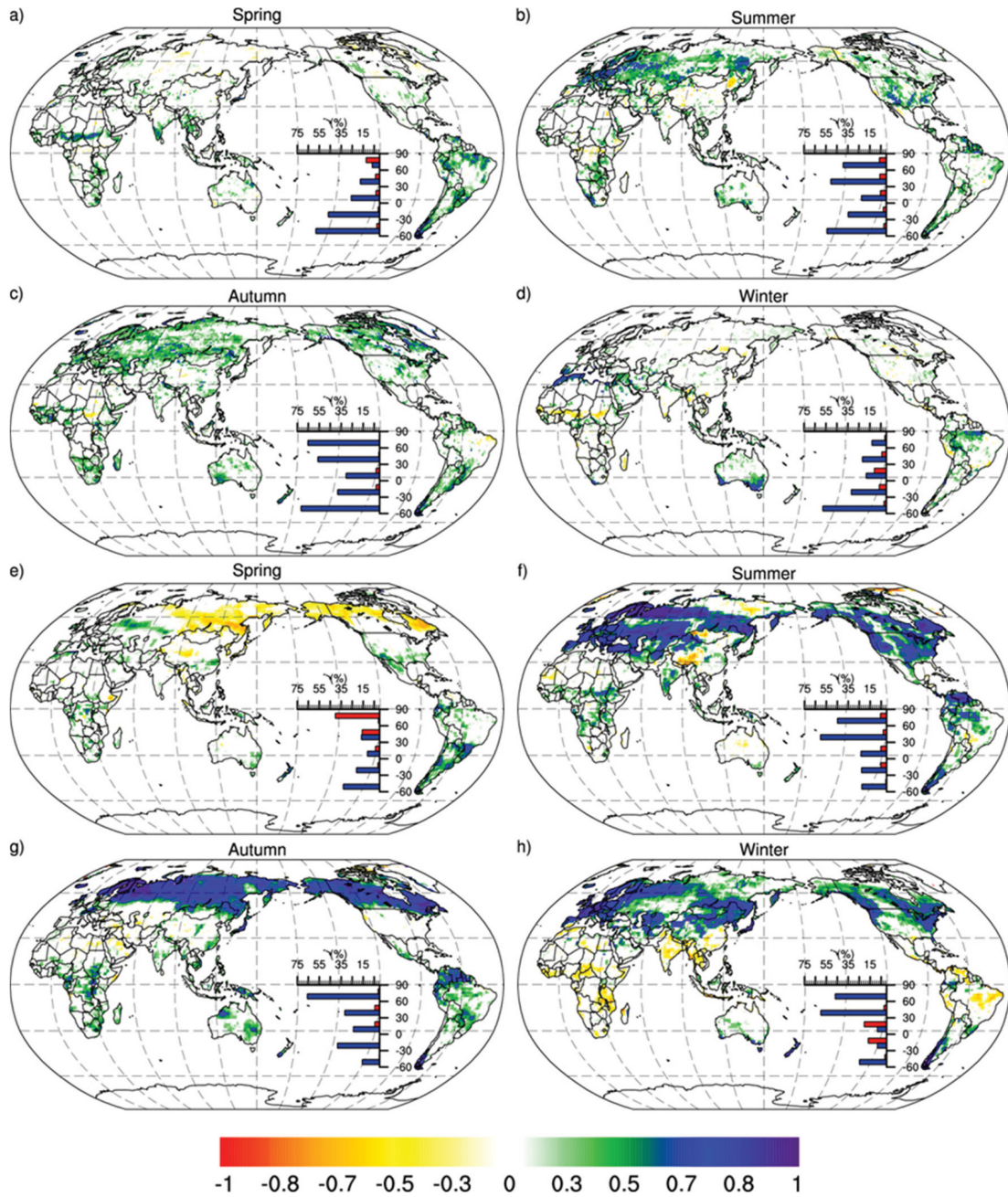


Fig. 9. Same as Fig. 8 but for using surface net solar radiation downwards.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 탄소추적시스템과 탄소 순환이 결합된 CMIP5 모델의 육상 생물권 이산화탄소 플럭스 자료를 이용하여 전지구 육상 탄소 플럭스의 특성을 분석하였다. 또한 편 상관관계 분석을 이용하여 기후 인

자의 변화에 따른 탄소 흡수의 변화를 분석하였다. CMIP5 모델들의 탄소 흡수는 시간이 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 모델들의 차이가 컸다. 앙상블 평균 NEP는 탄소추적시스템과 관측 자료에 비해 높았다. 2001년부터 2012년까지 탄소추적시스템의 NEP는 북반구 중위도 이상 대부분 지역에서 탄소 흡수가 뚜

렷했다. 그에 비해 CMIP5 모델의 앙상블 평균 NEP 결과는 전지구적으로 탄소를 흡수하는 것으로 모의하였지만, 유라시아지역 북방 침엽수림대에서는 탄소 흡수를 과소 모의하였다. GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR 모델들은 아프리카 대륙, 동남아시아, 남미 대륙, 미국 지역에 대해 탄소 흡수를 강하게 모의하였다. 이러한 네 개의 모델들은 다른 모델과는 다르게 산불 모듈을 포함하고 있으며, 각 모델 내에서 산불로 인한 에어로졸 효과와 식생의 생산성 강화로 인해 육상 탄소 흡수가 강하게 나타난 것으로 보였다. CESM1-BGC 모델은 열 개의 모델 중 유일하게 산불 모듈과 질소 순환 모듈을 포함하고 있어 산불 모듈만 포함하고 있는 네 개 모델과 달리 식생에서 탄소를 강하게 흡수하지 않았다.

육상 이산화탄소 플럭스는 기후 인자들의 변화에 따라 지역적으로 서로 다른 반응을 나타냈다. 탄소추적시스템의 NEP와 기온의 상관관계에서는 북반구 중위도 이상의 지역에서 양의 상관관계 비율이 높았다. 하지만 그 이하의 지역에서는 양의 상관관계가 나타나는 지역의 비율보다 음의 상관관계가 나타나는 지역의 비율이 더 높았다. 이는 CMIP5 앙상블 평균 결과에서도 나타났으며 대부분의 CMIP5 모델들에서도 탄소추적시스템과 유사한 결과를 나타냈다. CMIP5 모델들의 강수와 NEP의 상관관계 결과는 탄소추적시스템의 결과에서 볼 수 있는 특징들을 잘 나타내지 못하였다. 이는 각 CMIP5 모델들의 서로 다른 강수 모의 능력으로 인해 NEP와의 상관성이 관측 결과만큼 잘 나타나지 않았다. 일사량과 NEP의 상관관계 결과에서 탄소추적시스템은 대부분 위도대에서 양의 상관관계 비율이 높았다. 하지만 북반구와 남반구 모두 열대 지역에서는 양의 상관관계 비율이 다른 위도대에 비해 낮았다. 이러한 위도대별 특징은 대부분 CMIP5 모델들에서도 나타났지만 지역적으로 상관관계의 값이 높았다.

기온, 강수, 일사량의 변화에 따른 육상 탄소 플럭스의 반응은 계절별로 다르게 나타났다. 기온과 NEP의 편 상관관계 분석 결과에서, 탄소추적시스템은 봄철 북반구 중위도 지역에서 양의 상관관계 비율이 높았으며, 여름철에는 북반구 고위도 지역까지 양의 상관관계 비율이 높았다. 하지만 가을철이 되면서 낙엽 등의 분해로 인해 북반구 대부분 음의 상관관계 비율이 높았다. 겨울철에는 대부분 위도대에서 양의 상관관계 분포 비율이 높아졌다. CMIP5 모델들의 앙상블 평균 결과는 탄소추적시스템의 결과에서 볼 수 있었던 각 계절에 대한 위도대별 탄소 흡수의 특징이 잘 나타났다. 다만 각 계절에 대해 지역별로 상관관계의 값이 높았다. 강수와 NEP의 계절별 상관관계 분석 결과에서는 탄소추적시스템에서 볼 수 있었던 특징들이

CMIP5 모델들에서 북반구 중위도 이상의 지역에서는 잘 나타났지만 그 이하의 지역에서는 잘 나타나지 않았다. 일사량과 탄소 흡수의 편 상관관계 결과에서 탄소추적시스템은 봄철 북반구 고위도 지역에서 음의 상관관계 비율이 높았던 반면, 나머지 지역에서는 양의 상관관계 비율이 높았다. 또한 나머지 계절들에 대해서는 일사량과 양의 상관관계 비율이 높았다. 이러한 위도대별 특징들은 CMIP5 모델 결과에서 계절마다 잘 나타났지만 지역별로 상관관계의 강도가 강하여 탄소추적시스템 결과와 패턴 상관관계가 유의하게 나타나지 않았다. 본 연구에서 사용한 편 상관관계 분석은 두 변수 사이의 관계를 독립적으로 볼 수 있지만 편 상관관계의 차수가 증가할수록 즉, 통계되는 변수의 수가 많아질수록 상관관계의 신뢰성이 감소할 수 있는 단점이 있다. 편 상관관계의 결과들은 상관관계 신뢰성 테스트를 통해 검증이 되어야 하며, 향후 제한된 변수가 많은 편 상관관계 결과 해석 시 단순 상관관계 분석과 함께 비교할 필요가 있다.

본 연구는 탄소추적시스템을 기준으로 열 개의 기후 모델의 육상 탄소 변동성을 분석하였다. 또한 기후 인자에 따른 NEP의 변동성을 분석하였으며 기후 인자의 영향을 계절 및 지역에 따라 상세히 분석하였다. 편 상관관계 분석을 사용함으로써 단일 기후 인자와 NEP의 상관관계를 명확하게 분석할 수 있었다. NEP의 변동성은 탄소추적시스템의 결과와 CMIP5 앙상블 평균이 비교적 유사하였다. 각 모델 별로는 산불 모듈의 포함 여부, 질소 순환 모듈의 포함 여부에 따라 NEP 모의 성능에 차이를 보였다. 기온과 일사량은 NEP에 변화에 직접적인 영향을 주는 변수였으며 계절별 지역별로 기후 인자가 미치는 영향이 다를 수 확인할 수 있었다. 대부분 CMIP5 모델들의 기온과 일사량의 변화에 따른 NEP의 반응들은 탄소추적시스템과 유사한 결과를 보였다. 하지만 강수의 변화에 따른 NEP의 반응은 탄소추적시스템만 아니라 각 모델 별로도 다른 결과를 보였다. 이는 각 모델들의 강수 모의에 대한 큰 불확실성에 의한 것으로 향후 모델 성능 개선 및 기후변화 모의 자료 분석에 추가로 고려되어야 한다. 또한 육상 이산화탄소 플럭스의 공간적 변동성은 본 연구에서 사용한 기후적 요소들뿐만 아니라 주요 생지화학 과정 등 다른 요소들에 의해서도 반응을 보이고 있기 때문에 추후 이러한 모든 요소들에 대한 영향 분석이 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 “NIMS-2016-3100(기상업무지원기술개발연구)”의 지원으로 수행되었습니다. 세심한 심사를 해주신 두 분 심사위원께 감사를 전합니다.

## REFERENCES

- Anav, A., P. Friedlingstein, M. Kidston, L. Bopp, P. Ciais, P. Cox, C. Jones, M. Jung, R. Myneni, and Z. Zhu, 2013: Evaluating the land ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models. *J. Climate*, **26**, 6801-6843, doi:10.1175/JCLI-D-12-00417.1.
- Arora, V. K., J. F. Scinocca, G. J. Boer, J. R. Christian, K. L. Denman, G. M. Flato, V. V. Kharin, W. G. Lee, and W. J. Merryfield, 2011: Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05805, doi:10.1029/2010GL046270.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2013: Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP5 Earth system models. *J. Climate*, **26**, 5289-5314, doi:10.1175/JCLI-D-12-00494.1.
- Baba, K., R. Shibata, and M. Sibuya, 2004: Partial correlation and conditional correlation as measures of conditional independence. *Australian New Zealand J. Stat.*, **46**, 657-664.
- Basu, S., and Coauthors, 2011: The seasonal cycle amplitude of total column CO<sub>2</sub>: Factors behind the model-observation mismatch. *J. Geophys. Res.*, **116**, D23306, doi:10.1029/2011JD016124.
- Beer, C., and Coauthors, 2010: Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, **329**, 834-838, doi:10.1126/science.1184984.
- Boer, G. J., and V. K. Arora, 2010: Geographic aspects of temperature and concentration feedbacks in the carbon budget. *J. Climate*, **23**, 775-784, doi:10.1175/2009JCLI3161.1.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2013: Feedbacks in emission-driven and concentration-driven global carbon budget. *J. Climate*, **26**, 3326-3341, doi:10.1175/JCLI-D-12-00365.1.
- Booth, B. B., and C. D. Jones, 2011: Terrestrial response of QUMPC ensemble. *Hadley Centre Tech. Note* 89, 19 pp.
- Brovkin, V., T. Raddatz, C. H. Reick, M. Claussen, and V. Gayler, 2009: Global biogeophysical interactions between forest and climate. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07405.
- Chapin III, F. S., and Coauthors, 2005: Role of land-surface changes in arctic summer warming. *Science*, **310**, 657-660, doi:10.1126/science.1117368.
- Collins, W. J., and Coauthors, 2011: Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 1051-1075, doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.
- Denman, K. L., and Coauthors, 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, S. Solomon et al. Eds., Cambridge University Press, 589-662.
- Dufresne, J.-L., and Coauthors, 2013: Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Climate Dyn.*, **40**, 2123-2165, doi:10.1007/s00382-012-1636-1.
- Dunne, J. P., and Coauthors, 2012: GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon Earth System Models Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, **25**, 6646-6665, doi:10.1175/JCLI-D-11-00560.1.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2013: GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon Earth System Models. Part II: Carbon system formation and baseline simulation characteristics. *J. Climate*, **26**, 2247-2267, doi:10.1175/JCLI-D-12-00150.1.
- Friedlingstein, P., and Coauthors, 2006: Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *J. Climate*, **19**, 3337-3353.
- Gillett, N. P., P. A. Stott, and B. D. Santer, 2008: Attribution of cyclogenesis region sea surface temperature change to anthropogenic influence. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L09707, doi:10.1029/2008GL033670.
- \_\_\_\_\_, V. K. Arora, D. Matthews, and M. R. Allen, 2013: Constraining the ratio of global warming to cumulative CO<sub>2</sub> emissions using CMIP5 simulations. *J. Climate*, **26**, 6844-6858, doi:10.1175/JCLI-D-12-00476.1.
- Huijnen, V., and Coauthors, 2010: The global chemistry transport model TM5: Description and evaluation of the tropospheric chemistry version 3.0. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 445-473, doi:10.5194/gmd-3-445-2010.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. F. Stocker et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- Jiang, Y., Z. Lu, X. Liu, Y. Qian, K. Zhang, Y. Wang, and X.-Q. Yang, 2016: Impacts of global open-fire aerosols on direct radiative, cloud and surface-albedo effects simulated with CAM5. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 14805-14824, doi:10.5194/acp-16-14805-2016.
- Jones, A., J. M. Haywood, and O. Boucher, 2007: Aerosol forcing, climate response and climate sensitivity in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*,

- 112, D20211.
- Jones, C. D., and Coauthors, 2011: The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geo-sci. Model Dev.*, **4**, 543-570, doi:10.5194/gmd-4-543-2011.
- Kato, T., and Y. Tang, 2008: Spatial variability and major controlling factors of CO<sub>2</sub> sink strength in Asian terrestrial ecosystems: evidence from eddy covariance data. *Glob. Change Biol.*, **14**, 2333-2348.
- Krol, M., S. Houweling, B. Bregman, M. van den Broek, A. Segers, P. van Velthoven, W. Peers, F. Dentener, and P. Bergamaschi, 2005: The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: Algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 417-432.
- Kulawik, S., and Coauthors, 2016: Consistent evaluation of ACOS-GOSAT, BESD-SCIAMACHY, CarbonTracker, and MACC through comparisons to TCCON. *Atmos. Meas. Tech.*, **9**, 683-709, doi:10.5194/amt-9-683-2016.
- Landry, J.-S., H. D. Matthews, and N. Ramankutty, 2015: A global assessment of the carbon cycle and temperature responses to major changes in future fire regime. *Climatic Change*, **133**, 179-192, doi:10.1007/s10584-015-1461-8.
- \_\_\_\_\_, A.-I. Partanen, and H. D. Matthews, 2017: Carbon cycle and climate effects of forcing from fire-emitted aerosols. *Environ. Res. Lett.*, **12**, 025002, doi:10.1088/1748-9326/aa51de.
- Law, B. E., and Coauthors, 2002: Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agr. Forest Meteorol.*, **113**, 97-120.
- Le Quéré, C., and Coauthors, 2015: Global carbon budget 2015. *Earth Syst. Sci. Data*, **7**, 349-396, doi:10.5194/essd-7-349-2015.
- Lin, J.-L., 2007: Interdecadal variability of ENSO in 21 IPCC AR4 coupled GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L12702, doi:10.1029/2006GL028937.
- Long, M. C., K. Lindsay, S. Peacock, J. K. Moore, and S. C. Doney, 2013: Twentieth-century oceanic carbon uptake and storage in CESM1(BGC). *J. Climate*, **26**, 6775-6800, doi:10.1175/JCLI-D-12-00184.1.
- Mahowald, N., D. S. Ward, S. Kloster, M. G. Flanner, C. L. Heald, N. G. Heavens, P. G. Hess, J.-F. Lamarque, and P. Y. Chuang, 2011: Aerosol impacts on climate and biogeochemistry. *Annu. Rev. Env. Resour.*, **36**, 45-74, doi:10.1146/annurev-environ-042009-094507.
- Maier-Reimer, E., I. Kriest, J. Segsneider, and P. Wetzol, 2005: *The Hamburg Ocean Carbon Cycle model HAMOCC 5.1 - Technical description, Release 1.1.* Max-Planck Institute for Meteorology, 49 pp.
- Malhi, Y., 2002: Carbon in the atmosphere and terrestrial biosphere in the 21st century. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, **360**, 2925-2945.
- Moorcroft, P. R., 2006: How close are we to a predictive science of the biosphere? *Trends Ecol. Evol.*, **21**, 400-407.
- Nasrollahi, N., A., AghaKouchak, L. Cheng, L. Damberg, T. J. Phillips, C. Miao, K. Hsu, and S. Sorooshian, 2015: How well do CMIP5 climate simulations replicate historical trends and patterns of meteorological droughts? *Water Resour. Res.*, **51**, 2847-2864, doi:10.1002/2014WR016318.
- Peng, J., L. Dan, and M. Huang, 2014: Sensitivity of global and regional terrestrial carbon storage to the direct CO<sub>2</sub> effect and climate change based on the CMIP5 model intercomparison. *PLoS ONE*, **9**, e95282, doi:10.1371/journal.pone.0095282.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2015: Impact of CO<sub>2</sub> concentration and climate change on the terrestrial carbon flux using six global climate-carbon coupled models. *Ecol. Model.*, **304**, 69-83, doi:10.1016/j.ecolmodel.2015.02.016.
- Peters, W., J. B. Miller, J. Whitaker, A. S. Denning, A. Hirsch, M. C. Krol, D. Zupanski, L. Bruhwiler, and P. P. Tans, 2005: An ensemble data assimilation system to estimate CO<sub>2</sub> surface fluxes from atmospheric trace gas observations. *J. Geophys. Res.*, **110**, D24304, doi:10.1029/2005JD006157.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **104**, 18925-18930.
- Piao, S., and Coauthors, 2008: Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, **451**, 49-52.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2013: Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends. *Glob. Change Biol.*, **19**, 2117-2132, doi:10.1111/gcb.12187.
- Potter, C., S. Klooster, R. Myneni, V. Genovese, P.-N. Tan, and V. Kumer, 2003: Continental scale comparisons of terrestrial carbon sinks estimated from satellite data and ecosystem modeling. *Global Planet. Change*, **39**, 201-213.
- Raddatz, T. J., C. H. Reick, W. Knorr, J. Kattge, E. Roeckner, R. Schnur, K.-G. Schnitzler, P. Wetzol, and J. Jungclaus, 2007: Will the tropical land biosphere dominate the climatecarbon cycle feedback during the twenty-first century? *Climate Dyn.*, **29**, 565-574.
- Santer, B. D., and Coauthors, 2007: Identification of

- human induced changes in atmospheric moisture content. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **104**, 15248-15253.
- Schneising, O., M. Reuter, M. Buchwitz, J. Heymann, H. Bovensmann, and J. P. Burrows, 2014: Terrestrial carbon sink observed from space: Variation of growth rates and seasonal cycle amplitudes in response to interannual surface temperature variability. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 133-141, doi:10.5194/acp-14-133-2014.
- Shao, P., X. Zeng, K. Sakaguchi, R. K. Monson, and X. Zeng, 2013: Terrestrial carbon cycle - climate relations in eight CMIP5 earth system models. *J. Climate*, **26**, 8744-8764, doi:10.1175/JCLI-D-12-00831.1.
- Sokolov, A. P., D. W. Kicklighter, J. M. Melillo, B. S. Felzer, C. A. Schlosser, and T. W. Cronin, 2008: Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle. *J. Climate*, **21**, 3776-3796, doi:10.1175/2008JCLI2038.1.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, 2012: An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 485-498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Thornton, P. E., J.-F. Lamarque, N. A. Rosenbloom, and N. M. Mahowald, 2007: Influence of carbon-nitrogen cycle coupling on land model response to CO<sub>2</sub> fertilization and climate variability. *Global Biogeochem. Cy.*, **21**, GB4018, doi:10.1029/2006GB002868.
- Watanabe, S., and Coauthors, 2011: MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.
- Wu, T., and Coauthors, 2013: Global Carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last Century. *J. Geophys. Res.*, **118**, 4326-4347, doi:10.1002/jgrd.50320.
- Xia, J., J. Chen, S. Piao, P. Ciais, Y. Luo, and S. Wan, 2014: Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nat. Geosci.*, **7**, 173-180, doi:10.1038/NGEO2093.
- Zaehle, S., P. Friedlingstein, and A. D. Friend, 2010a: Terrestrial nitrogen feedbacks may accelerate future climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L01401, doi:10.1029/2009GL041345.
- \_\_\_\_\_, A. D. Friend, P. Friedlingstein, F. Dentener, P. Peylin, and M. Schulz, 2010b: Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 2. Role of the nitrogen cycle in the historical terrestrial carbon balance. *Global Biogeochem. Cy.*, **24**, GB1006, doi:10.1029/2009GB003522.
- Zeng, N., A. Mariotti, and P. Wetzal, 2005: Terrestrial mechanisms of interannual CO<sub>2</sub> variability. *Global Biogeochem. Cy.*, **19**, GB1016, doi:10.1029/2004GB002273.
- Zeng, Z.-C., and Coauthors, 2017: Global land mapping of satellite-observed CO<sub>2</sub> total columns using spatio-temporal geostatistics. *Int. J. Digital Earth*, **10**, 426-456, doi:10.1080/17538947.2016.1156777.
- Zhao, M., and S. W. Running, 2010: Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, **329**, 940-943, doi:10.1126/science.1192666.
- Zickfeld, K., M. Eby, H. D. Matthews, A. Schmittner, and A. J. Weaver, 2011: Nonlinearity of carbon cycle feedbacks. *J. Climate*, **24**, 4255-4275, doi:10.1175/2011JCLI3898.1.