

해양극지기초원천기술개발사업
(Brain Research Program)

위성 기반의 툰드라 지역 탄소와 물 플럭스 시공간 패턴
분석
(Remote sensing of spatial and temporal patterns in carbon
and water fluxes across arctic tundra region)

크지연구소

2021. 03

서울대학교

과학기술정보통신부

제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 "위성 기반에 툰드라 지역 탄소와 물 플럭스 시공간 패턴분석에 관한 연구"과제의 (최종: 2016.05~2021.03) 보고서로 제출합니다.

2021년 03월 31일

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 류영렬

연구 원 : Bolun Li

" : 공주원



극지연구소

최종보고서										보안등급	
										일반[v], 보안[]	
중앙행정기관명		과학기술정보통신부			사업명		거대과학연구개발사업				
전문기관명(해당 시 작성)		한국해양과학기술원 부설 극지연구소			내역사업명(해당 시 작성)		해양극지기초원천기술 개발사업				
공고번호					총괄연구개발 식별번호(해당 시 작성)		2016M1A5A1027157				
					연구개발과제번호		2016M1A5A1901789				
기술분류	국가과학기술 표준분류	ND0506	60%	ND0511	40%	3순위 소분류 코드명		%			
	부처기술분류(해당 시 작성)	1순위 소분류 코드명	%	2순위 소분류 코드명	%	3순위 소분류 코드명		%			
총괄연구개발명(해당 시 작성)		국문	한북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발								
		영문	Circum Arctic Permafrost Environment Change Monitoring, Future Prediction and development Techniques of useful biomaterials(CAPEC)								
연구개발과제명		국문	위성 기반의 툰드라 지역 탄소와 물 플럭스 시공간 패턴 분석								
		영문	Remote sensing of spatial and temporal patterns in carbon and water fluxes across arctic tundra region								
주관연구개발기관		기관명	서울대학교			사업자등록번호		119-82-03684			
		주소	(우)08826 서울사 관악구 관악로1 (서울대학교 942동 5층)			법인등록번호		114371-0009224			
연구책임자		성명	류영렬			직위		정교수			
		연락처	직장전화	02-880-4871			휴대전화		010-3133-2007		
			전자우편	ryyu@snu.ac.kr			국가연구자번호		10396136		
연구개발기간		전체	2016. 05. 01 - 2021. 03. 31 (5년 1 개월)								
		단계(해당 시 작성)	1단계	2016. 05. 01 - 2017. 12. 31 (1년 8 개월)							
			2단계	2018. 01. 01 - 2021. 03. 31 (3년 3 개월)							
연구개발비(단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금
			현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	
총계											
1단계	1년차	30,000						30,000			
	2년차	40,000						40,000			
n단계	1년차	40,000						40,000			
	2년차	40,000						40,000			
	3년차	40,000						40,000			
공동연구개발기관 등(해당 시 작성)		기관명	책임자		직위	휴대전화	전자우편	비고			
								역할		기관유형	
		공동연구개발기관									
위탁연구개발기관											

연구개발기관 외 기관							
연구개발담당자 실무담당자	성명		공주원	직위		참여연구원	
	연락처	직장전화	02-880-4741	휴대전화		010-7174-628	
		전자우편	paradigm21c@gmail.com	국가연구자번호		11659425	

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021 년 03 월 31 일

연구책임자: 류영렬 (인) 

주관연구개발기관의 장: 서울대학교 산학협력단 (직인)

공동연구개발기관의 장: (직인)

위탁연구개발기관의 장: (직인)

중앙행정기관의 장 귀하



< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		거대과학연구개발사업		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		2016M1A5A1027157	
내역사업명 (해당 시 작성)		해양극지기초원천기술개발사업		연구개발과제번호		2016M1A5A1901789	
기술 분 류	국가과학기술 표준분류	ND0506	60%	ND0511	40%	3순위 소분류 코드명	%
	부처기술분류 (해당 시 작성)	1순위 소분류 코드명	%	2순위 소분류 코드명	%	3순위 소분류 코드명	%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		한북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발					
연구개발과제명		위성 기반의 툰드라 지역 탄소와 물 플럭스 시공간 패턴 분석					
전체 연구개발기간		2016.05.01. - 2021.03.31. (5년 1개월)					
총 연구개발비		총 19,000 천원 (정부지원연구개발비: 19,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
연구개발단계		기초[v] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		지구 온난화에 의해 변화하는 극지 툰드라 지역의 탄소 및 물 플럭스의 시공간패턴을 위성 기반인 생물리모형 Breathing Earth System Simulator (BESS) 이용하여 이해				
	전체 내용		지구 온난화에 의해 변화하는 극지 툰드라 지역의 탄소와 물 플럭스의 시공간 패턴 이해				
	1단계 (해당 시 작성)	목표	MODIS 위성 자료 다운로드 및 전처리하고 고위도 특성을 반영한 입력자료 구축				
		내용	<ul style="list-style-type: none"> ◆ BESS (Breathing Earth System Simulator) 기반의 탄소와 물 플럭스 지도 제작을 위한 입력 자료 구축 ◆ MODIS 위성자료 다운로드 및 전처리 ◆ 고위도 특성을 반영한 입력자료 구축 				
2단계 (해당 시 작성)	목표	BESS 산출물 평가 및 향상으로 극지 툰드라 지역의 탄소와 물 플럭스의 시공간 패턴 이해					

		내용	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 플럭스 타워 관측 자료 이용하여 BESS모형 평가 및 향상 ◆ 1km 해상도, 8일 단위의 총광합성, 증발산 지도 제작 ◆ 제작된 지도를 이용하여 탄소와 물 플럭스의 시공간 패턴 및 조절하는 주요인자 분석
--	--	----	--

연구개발성과	생물리기작 모델 BESS를 활용하여 탄소 및 물 순환지도를 만들어 1km 해상도의 탄소와 물 플럭스 지도 제작하여 시공간패턴 분석
--------	--

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<p>○ 극지 자원 탐사</p> <p>- MODIS 데이터를 활용하여 복사, 탄소 및 물 순환지도를 만들어 1km 해상도의 탄소와 물 플럭스 지도로부터 carbon sink hotspot등을 탐지할 수 있을 것으로 기대</p> <p>○ 지면모형 향상에 기여</p> <p>- BESS모형 향상을 통한 극지 툰드라 지역의 탄소와 물 플럭스 예측력 높은 지면 모형 개발에 기여</p> <p>○ 탄소 배출권 시장에 선도 대응</p> <p>- 툰드라 광역 규모에서의 탄소 플럭스 정량화를 통해, 탄소 배출권 사업을 진단하고 예측하는데 기여</p> <p>○ 위성 산업 발전에 기여</p> <p>- 현장에서 자동관측되는 분광반사율 자료를 이용하여 위성 영상의 반사율 정보를 평가</p> <p>- 에디공분산에서 관측되는 탄소와 물 플럭스의 시계열 변화를 가장 잘 포착 할 수 있는 파장대 선정에 기여</p>
---------------------------	---

연구개발성과의 비공개여부 및 사 유	
---------------------------	--

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
2												

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	생물리기작모형	위성영상	광합성	증발산	플럭스
------------------	---------	------	-----	-----	-----

영문핵심어 (5개 이내)	BESS	Remote sensing	Photosynthesis	Evapotranspiration	Flux
------------------	------	----------------	----------------	--------------------	------

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	7
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	31
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	42
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	42
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	45
별첨자료 (참고 문헌 등).....	46



1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표

구분	내용	
최종목표	지구 온난화에 의해 변화하는 극지 툰드라 지역의 탄소 및 물 플럭스의 시공간패턴을 위성 기반인 생물리모형 Breathing Earth System Simulator (BESS) 이용하여 이해	
세부목표	1차년도	현장 사이트에 분광계 설치 및 자동 관측 시스템 구축
	1차년도	BESS의 핵심 파라미터 자료 관측
	2차년도	MODIS 다운로드 및 전처리
	2차년도	고위도 특성을 반영한 입력자료 구축
	3차년도	플럭스 타워 관측 자료 이용하여 BESS모형 평가 및 향상
	4차년도	2000-2018 년 기간 동안 1km 해상도, 8일 단위의 총광 합성, 증발산 지도 제작
	5차년도	제작된 지도를 이용하여 탄소와 물 플럭스의 시공간 패턴 분석
	5차년도	시공간 패턴 조절하는 주요 인자 분석

나. 연구내용 및 범위

세부연구목표	세부연구개발내용 및 범위	평가목표 및 착안점
현장 사이트에 분광계 설치 및 자동 관측 시스템 구축	- LED 분광계 설치 및 유지 - 생물계절 모니터링	시스템 사진 촬영
BESS의 핵심 파라미터 자료 관측	- 분광 반사율 관측 - 엽면적지수 관측	관측 자료 제시
MODIS 다운로드 및 전처리	27개의 MODIS 위성 자료, 8개의 재 분석 자료, 총 35개의 입력자료 다운로드 및 전처리	서버에 다운로드 된 자료 제시
고위도 특성을 반영한 입력자료 구축	- 태양의 고도각의 극값 제거 - 고위도 특성을 반영하며 투영계	프로그래밍 코드 및 구축된 자료 제시

	표준화 및 영상합성(image fusion)으로 상호 보정 병행	
플렉스 타워 관측 자료 이용하여 BESS모형 평가 및 향상	- 극지연구소와 해외 플렉스 네트워크 자료 이용한 모형 평가 - 평가를 바탕으로 모형 향상	평가 결과를 그래프로 제시
2000-2018 년 기간 동안 1km 해상도, 8일 단위의 총광합성, 증발산 지도 제작	- 광합성 지도 제작 - 증발산 지도 제작	구축된 지도 공개
제작된 지도를 이용하여 탄소와 물 플렉스의 시공간 패턴 분석	- 공간 변이 이해 및 시간에 따른 추세 변화 분석	시공간 패턴 제시
시공간 패턴 조절하는 주요 인자 분석	- 인자 분석	주요 인자의 시공간 패턴을 지도로 제시

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. BESS (Breathing Earth System Simulator) 모형

Breathing Earth System Simulator(BESS)은 생물리적인 process-based model 관계식을 이용해 지속적으로 총일차생산량과 증발산량을 1-5 km의 공간해상도에 8일의 시간 해상도로 구축되어있다. 먼저 몬테카를로 접근에 기인한 대기복사 모델을 (Forest Light Environment Simulator (FLiES) 이용해 단파 복사, 광합성 유효 방사 및 산란일사량을 계산하고, 군락의 sunlit/shade 부분에 의해 흡수된 광량을 계산한다. 식생유형에 따라 25°C 및 수준에서의 maximum carboxylation rate (Vcmax)를 예측한 뒤 군락 수준으로 추정한다. 이후 C3 및 C4 식물로 구분해서 적용된 Farquhar 생화학 모델, Ball-Berry Stomatal conductance equation 통해 총일차생산량을 산출하고, Penman-Monteith 모델을 이용해 증발산량을 산출한다(Fig.1.;Fig. 2.). BESS에 들어가는 자료는 (Table 1.)과 같다.

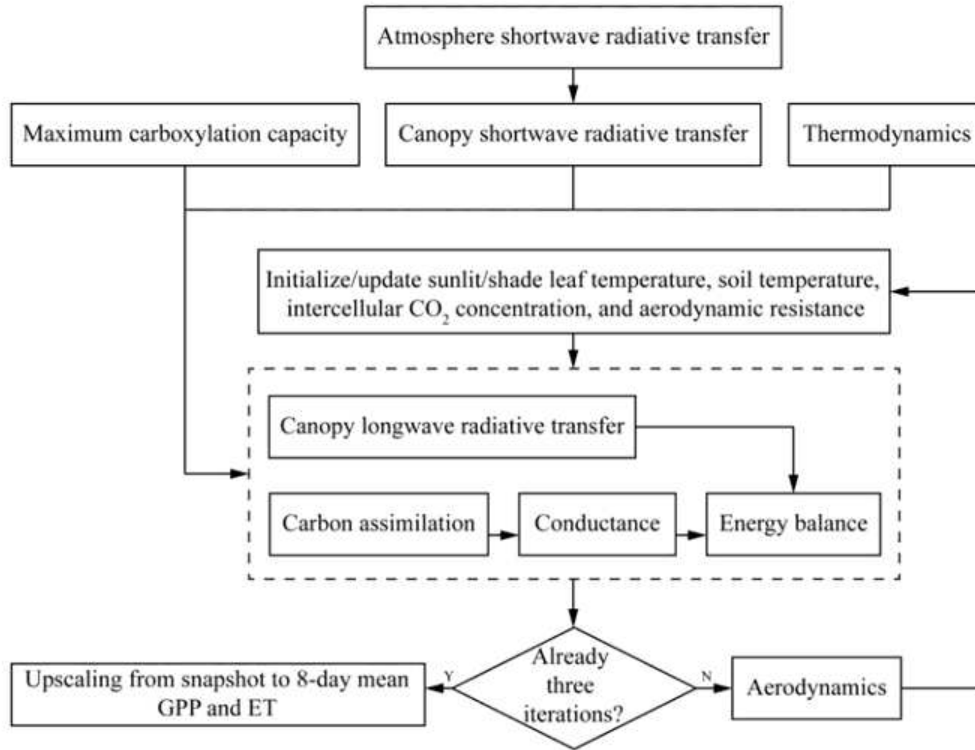


Fig. 1. Algorithm of BESS GPP and ET (Jiang and Ryu 2016)

BESS	
Type of Approach	Process-based
Gross Primary Production	Farquhar et al. (1980) Plant Functional Type-dependent Look-up Table for V_{cmax}^{25}
Spatial Resolution (°) and Range	1/100° Global
Temporal Resolution and Range	8 Day 2000 – 2015
Climate Dataset	NCEP/NCAR Reanalysis ERA-Interim
Radiation Dataset (Spatial Resolution)	BESS Radiation (0.05°)
MODIS Input Products	Land Surface Temperature (MOD11A1) Leaf Area Index (MCD 15A2)
Other MODIS Input Products	Aerosol (MOD04_L2) Atmosphere Profile (MOD07_L2) Cloud (MOD06_L2) Albedo (MCD43B3) Surface Temperature (MOD11A1)
Land cover Reference	(Jiang and Ryu, 2016; Ryu et al., 2011)

Fig. 2. Summary of BESS model

Table 1. Forcing data of BESS model

	Dataset	시간 해상도	공간 해상도
1.	MOD04_L2 aerosol product	Daily	10 km
2.	MOD06_L2 cloud product	Daily	5 km
3.	MOD07_L2 atmosphere profile product	Daily	5 km
4.	MOD11A1 land surface temperature product	Daily	1 km
5.	MCD12Q1 land cover product	Annual	500 m
6.	MOD15A2 leaf area index product	8-day	1 km
7.	MCD43B3 albedo product	8-day	1 km
8.	OCO-2 Lite XCO2 product	Daily	3 km
9.	MODIS global clumping index map	-	1 km
10.	ICESat/GLAS global forest canopy height map	-	1 km
11.	STRM global elevation map	-	30"
12.	ERA Interim Reanalysis air temperature data	3-hour	0.75°
13.	ERA Interim Reanalysis dew point temperature data	3-hour	0.75°
14.	NCEP/NCAR Reanalysis U-wind data	Daily	2°
15.	NCEP/NCAR Reanalysis V-wind data	Daily	2°
16.	Still global C3 and C4 Distribution map	-	1°
17.	Köppen-Geiger global climate classification map	-	0.5°
18.	NOAA global carbon dioxide growth rates data	Annual	-

나. BESS의 핵심 파라미터 자료 관측

1. LED 기반 분광계 유지 및 관리

- 2014-2016년 기간 동안 기존의 LED 센서로 알래스카 카운실 지역의 지표 반사도를 구할 수 있었음. 이를 바탕으로 정규식생지수(Normalized vegetation index, NDVI)을 구했었음 (Fig. 3.).

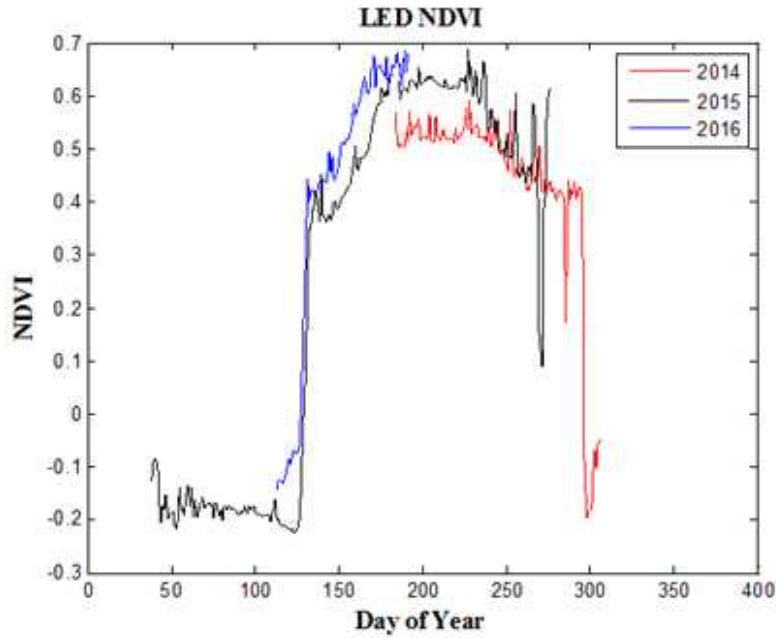


Fig. 3. In situ NDVI measured by LED sensor (2014–2016)

- 기온의 변화에 따라 지형의 변화하여 센서의 수평을 유지하기 어려움 (Fig. 4.). 따라서, 새로 제작한 LED 센서는 기존의 센서에 비해 기능과 견고함이 향상됨. 2019년 겨울까지 시범적으로 설치하고 운영한 뒤 향후 LED 센서 설치계획을 구상 (Fig. 4.).



Fig. 4. (Left) Previous version LED sensor in spring season. (Right) Newly installed LED sensor on 2019

-들어오는 빛을 인식하는 센서와 나가는 빛을 인식하는 센서를 하늘 방향으로 관측하게 한 뒤, 각 센서가 태양의 고도에 따라 변화하는 빛의 세기를 인식하는 정도를 비교함으로써 두 센서 간의 calibration coefficient 계산함(Fig. 5.).



Fig. 5. Calibration of LED sensor

2. 현장에서 관측된 BESS 핵심파라미터와 분광계 자료 간의 비교



Fig. 6. Study site. Tussock tundra council, Alaska

- 극지방에 있는 알래스카의 카운실 현장을 방문(Fig. 6.)
- 임의 표본으로 Cloudberry가 우점하고 있는 지점에 플랏 20x20cm 선택함
플랏 마다 분광계를 이용한 잎 단위 반사도, 엽면적지수, 그리고 토양 온도와 수분 측정함.
(Table 2.)
- 플랏 16에서 cloud berry의 잎을 스캔하여 엽면적지수를 각 플랏 별(20x20cm)로 구함
(Fig. 7)
- 플랏마다 모든 잎을 따서 스캔하여 엽면적 구함 (Fig. 7.)

Table 2. In situ data on each plot (“-“no data)

Plot	Understory	Leaf area	Soil	Soil water (us)	Soil water(%)	NDVI
------	------------	-----------	------	-----------------	---------------	------

	vegetation	index	temperature (°C)			
1	Moss	0.62	6.9	2.08	20.7	0.85
2	Lichens	0.10	4.5	2.47	35.5	0.71
3	Moss	0.64	2.3	2.52	37.1	0.79
4	Moss	0.60	6.4	2.16	23.8	0.82
5	Moss	1.07	5.6	1.67	5.2	-
6	Lichens	0.31	15.9	1.60	2.9	-
7	Moss	0.53	7.0	1.83	10.7	-
8	Lichens	0.17	4.5	2.95	49.3	-
9	Moss	0.52	6.2	2.52	37.3	0.83
10	Moss	0.53	5.9	1.85	11.3	0.84
11	Lichens	0.19	6.7	2.29	28.9	0.71
12	Moss	0.93	-	1.75	7.9	0.84
13	Moss	0.39	4.2	1.95	15.3	0.83
14	Moss	0.81	7.3	1.86	11.99	0.85
15	Lichens	0.20	5.2	2.04	19.3	0.68
16	Moss	1.03	6.5	1.96	15.9	0.80



Fig. 7. (Left) Plot 16. (Right) Scanned image for LAI measurements at plot 16

다. 데이터 다운로드 및 전처리

1. MODIS 자료 다운로드

BESS 모형으로 일사량을 (Solar radiation)을 산출하기 위해 Terra와 Aqua MODIS 대기와 육지 자료들을 내려받았다 (Table 1). MODIS 대기 (Collection 6) 와 육지 (Collection 5) 자료들 및 4가지 다른 인공위성 영상, 재평가된 자료 그리고 3가지 보조 자료를 입력자료로 서버에 내려받았으며 총 35개의 입력자료 구축을 완료했다(Fig. 8.; Fig. 9.). MOD04_L2 일 단위 에어로졸 (dark target and deep blue combined aerosol optical depth at 500m) 데이터 (Fig. 10.), MOD06_L2 구름 (cloud optical thickness, cloud top pressure, cloud top temperature, surface pressure and surface temperature) 데이터 (Fig. 11.), MOD/MYD07_L2 (total column precipitable water vapor and total ozone burden, atmospheric profile) 데이터, MOD11A1 일 단위 토지 표면 온도 (land surface temperature) 데이터 (Fig. 12.), MCD12Q1 연간 토지피복 데이터, MOD15A2 8일간의 엽면적지수 (LAI) 데이터 (Fig. 13.) 그리고 MCD43D61 알베도 데이터를 2001년에서 2018년 사이 수집했다. 고속화 알고리즘 (fast algorithm)을 개발하여, MOD04_L2, MOD06_L2, 그리고 MOD07_L2의 'swath'데이터를 'tile' 데이터로 sinusoidal 투영계로 변환하였다.

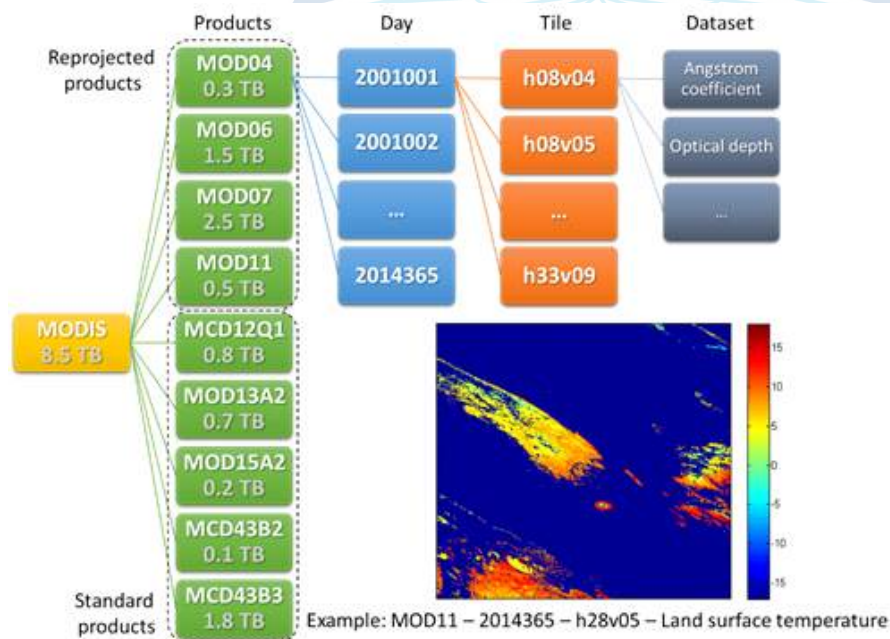


Fig. 8. MODIS data processing



Fig. 9. RGB image (출처: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>)

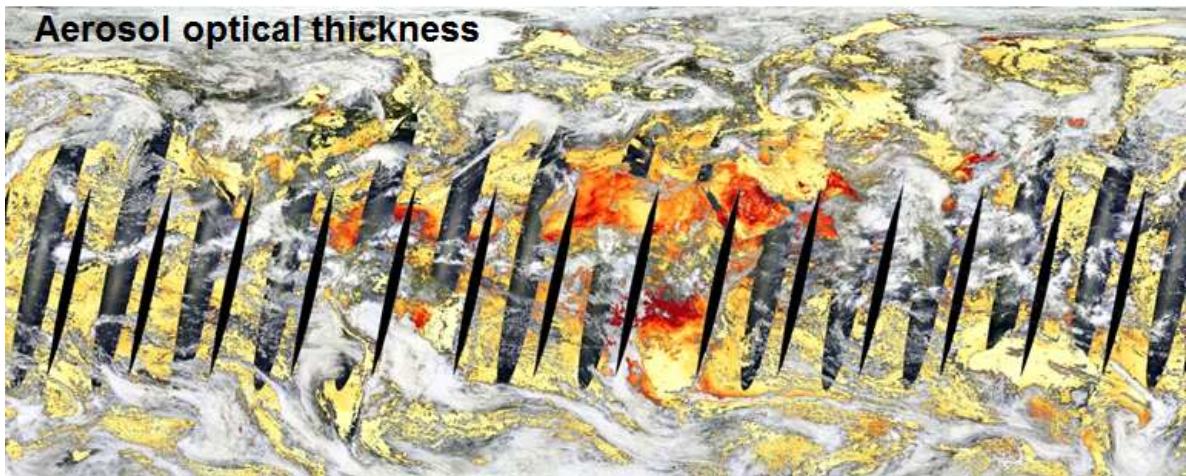


Fig. 10. MOD04_L2 Aerosol optical thickness



Fig. 11. MOD06_L2 Cloud optical thickness

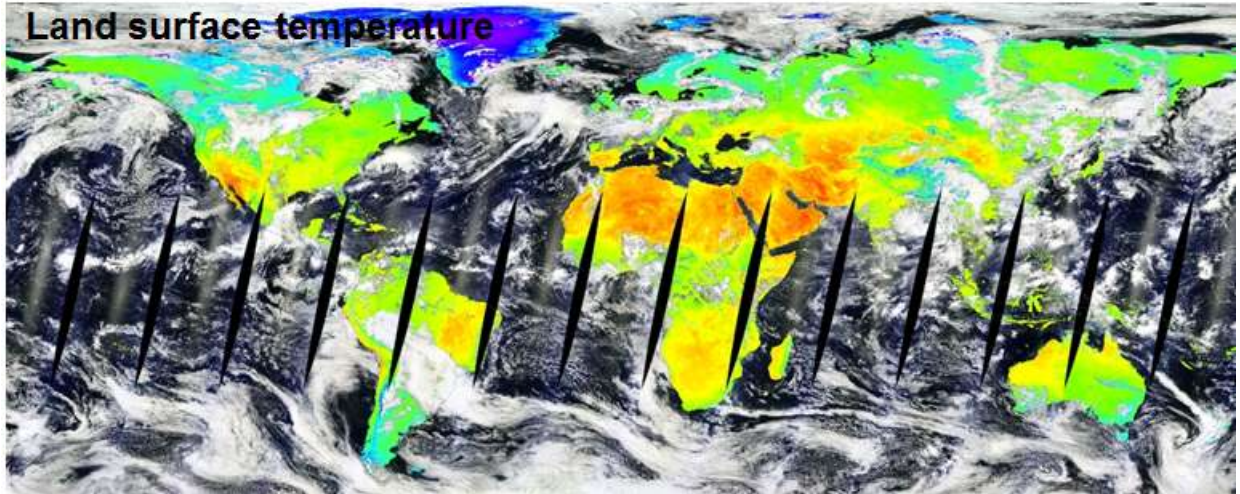


Fig. 12. MOD11A1 Land surface temperature

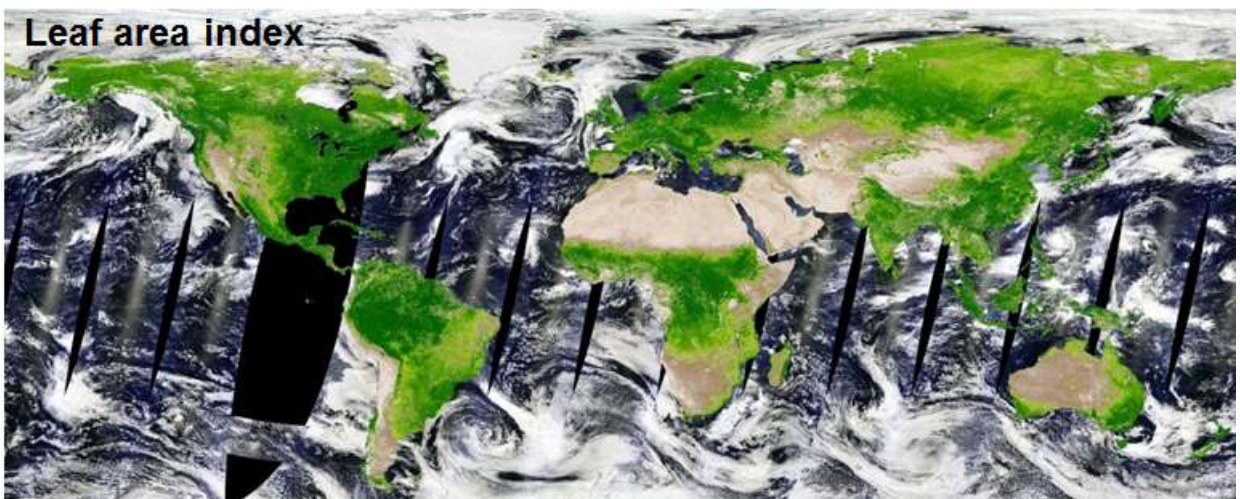


Fig. 13. MOD15A2 Leaf are index

2. MODIS 데이터 재투영

MODIS 대기 데이터는 swath 형태로 제공되는 반면에 MODIS 지면 데이터는 sinusoidal 좌표계로 구성되기에 재투영 (reprojection) 과정이 필수이다. 각 지표면 sinusoidal 픽셀과 교차하는 swath를 찾는다. 각 swath의 네 꼭짓점 좌표를 활용한다. 그다음에 각 tile 픽셀별로 제일 가까운 swath 픽셀을 최근방 리샘플링 (nearest neighbourhood resampling) 방법으로 추출한다. 대기와 육지가 같은 좌표계를 갖기 위해 10 km aerosol optical depth, 1 km cloud optical thickness, 5 km total precipitable water vapor, 그리고 5 km total ozone burden 의 5분 단위로 스캔된 swath들을 0.05° 해상도로 최근방 리샘플링 방법을 이용해 재투영을 수행했다. 30" 해상도인 알베도 자료도 이 방법으로 0.05° 해상도로 재투영했다 (Fig. 14.).

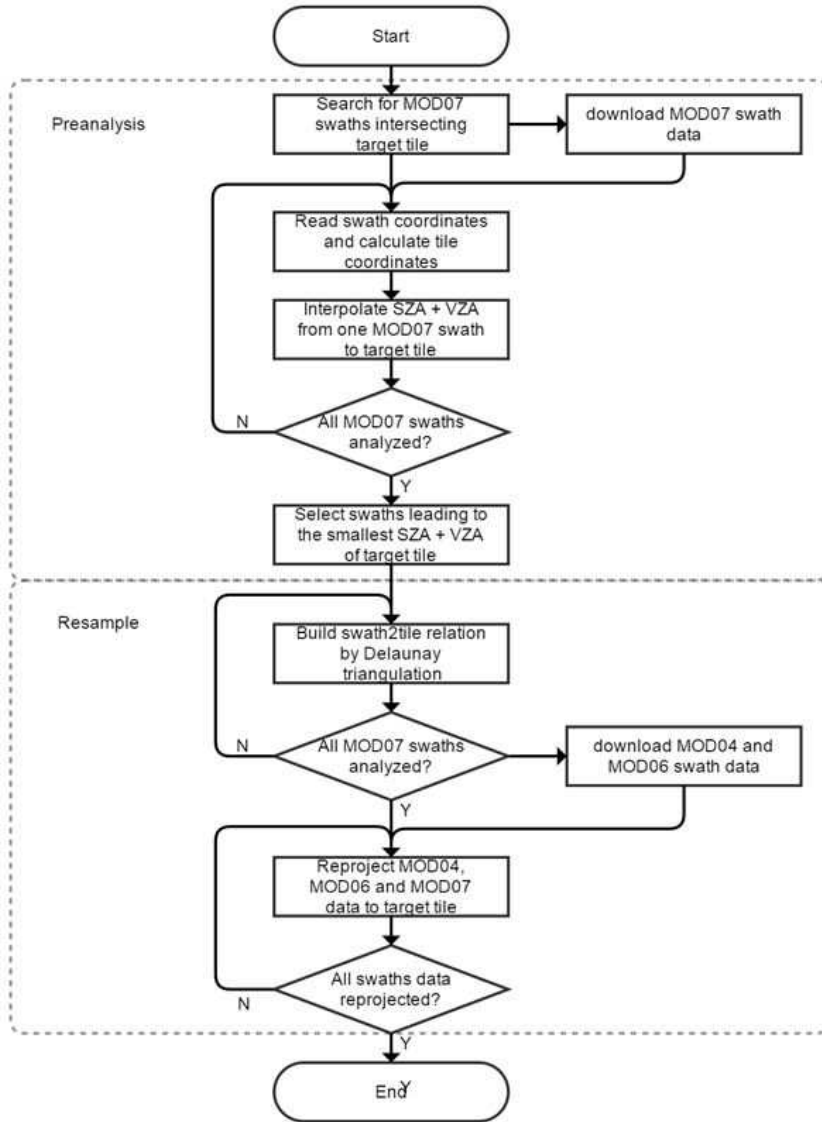


Fig. 14. Flow char for reprojection algorithm

3. MODIS 보정

MOD11A1 육지 지표면 온도 (Land surface temperature) 자료의 data gap은 MOD06_L2 지표면 온도 자료를 이용해 보완했고 이 결과로 sunlit/shade 온도와 토양 온도의 추정을 위해 이용되었다. MCD15A2 엽면적지수 (leaf area index, LAI)는 플렉스 예측에 있어 가장 민감한 자료로 구름에 의한 데이터 오류를 완화하기 위해 간단한 시계열 분석 방식으로 필터링 되었다. MODIS aerosol optical depth, total column precipitable water vapor 그리고 total ozone burden 자료들은 구름이 없는 clear-sky 경우에만 가능하며 모든 하늘 (all-sky) 상황에 있는 복사를 산출하기 위해 MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) 재분석 자료로 데이터 gap을 채웠다. MERRA 데이터는 $0.5^\circ \times 0.66^\circ$ 공

간 해상도, 한 시간마다 제공되어 있으므로 이 자료를 0.05° 그리드로 시공간적으로 내삽했다. MODIS와 MERRA 자료가 일치하도록 하루하루 각각의 기후대 별로 MERRA를 MODIS 자료로 보정했다 (Fig. 15.).

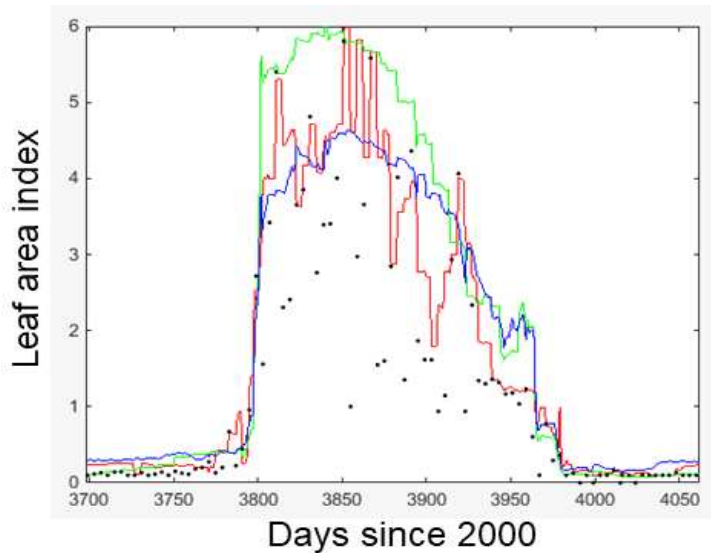


Fig. 15. Example for LAI filtering .(Block dot MODIS data; Red line: filtered MODIS data; Blue line filtered VGT data; Green line: filtered AVHRR/NOAA data

라. 고위도 특성 반영한 입력자료

MODIS와 같은 극궤도 위성은 극지방에서 재방문빈도가 높다 (Fig. 16.). 적도지방은 1~3일 간격으로 자료가 가용하나 극지방에서는 하루에 여러 장의 위성 영상이 가용한다. 따라서 극지방에서 가용한 모든 자료를 내려받았으며, 0.05도 해상도로 재투영을 완료하였다. 따라서 대기복사는 하루 여러 차례 영상을 이용한 계산이 가능하도록 함.

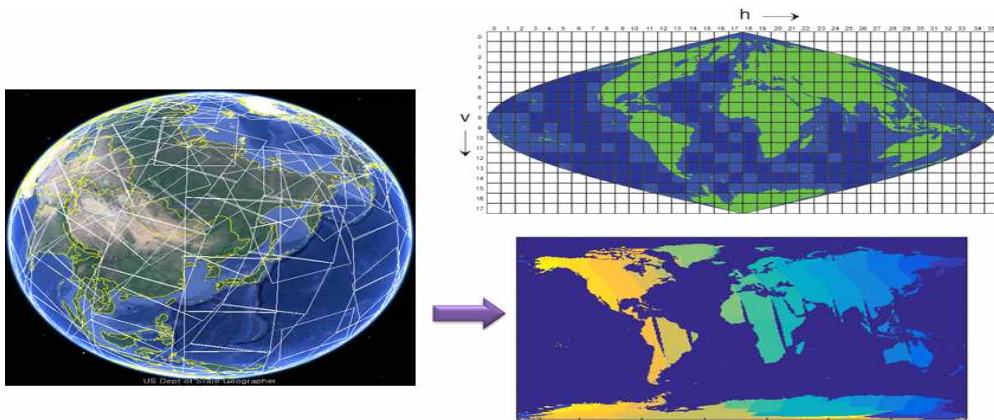


Fig. 16. Reprojection in the preprocessing

MOD11A1 지표면 온도 (Land surface temperature) 자료의 데이터 공백은 MOD06_L2의 표면 온도 자료를 이용해 보완되었고, 이것은 sunlit/shade 온도와 토양 온도의 추정을 위해 이용되었다. MDC15A2 엽면적지수 (Leaf area index, LAI)는 플렉스 예측에 있어 가장 민감한 자료로 구름에 의한 데이터 오류를 완화하기 위해 간단한 시계열 분석 방식으로 필터링되었다 (Fig. 17.).

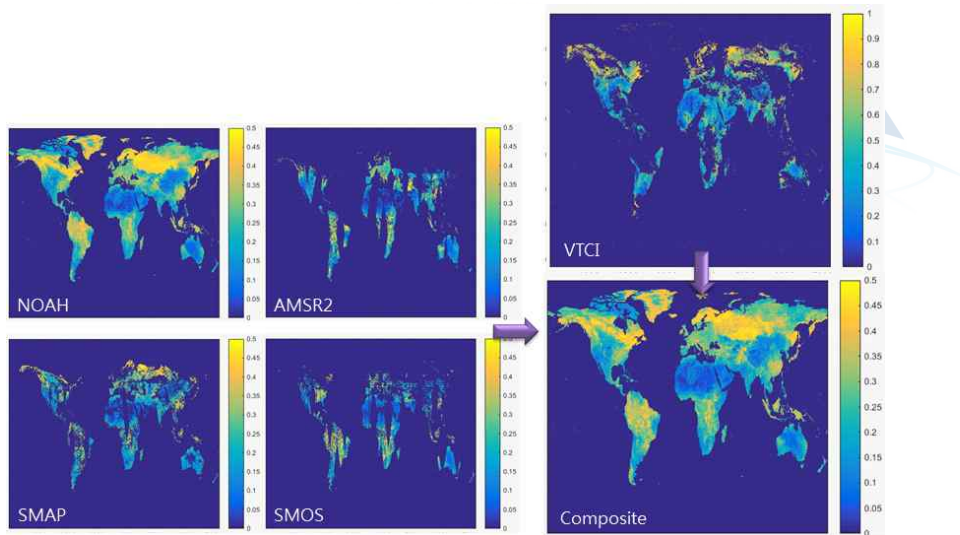


Fig. 17. Image fusion and cross calibration (e.g., soil water)

마. BESS 모델 평가 및 향상

1. BESS 모델의 총광합성 데이터 평가

- 모델에서 산출되는 데이터로 모델의 성능을 평가하기 위해 플렉스타워 위치와 가장 가까운 픽셀을 추출함.
- 통계적으로 잡신호를 제거하고, 이차원 내삽법을 이용하여 평균 일변화는 유지하면서 gap-filling 함.

- gap-filling 된 자료를 통해 비교한 결과를 선형회귀분석을 통해 상관계수 (r^2), 상대 평균 제곱근 오차 (rRMSE), 상대 편향성(rBias)을 계산함 (Table 3.).
- 또한, 픽셀보다 플렉스 네트워크 데이터의 범위가 좁아서 BESS 모델의 공간 해상도의 변화에 따른 상관관계의 변화도 분석함 (Table 4.).

Table 3. Evaluation of BESS model against flux data over different ecosystem types

BESS GPP				
Ecosystem Types	Sites	r^2	RMSE (rRMSE)	Bias (rBias)
ENF	6	0.82	1.01 (55%)	0.08 (4%)
DBF	1	0.93	0.68 (41%)	0.35 (21%)
Tundra	7	0.69	1.25 (184%)	0.67 (99%)
Fire	3	0.65	1.04 (95%)	0.51 (46%)
Overall	17	0.74	1.12 (90%)	0.41 (33%)

Table 4. Linear relationship between BESS model and flux data in different spatial resolution

Model	Validation Scores	Spatial Resolution		
		0.01°	0.033°	0.083°
BESS	r^2	0.74	0.73	0.74
	rRMSE(%)	90	82	80
	rBias(%)	33	32	34

2. BESS 모델 향상

- 기존 지면모형들에서 알래스카 지역의 maximum carboxylation rate (V_{cmax})는 일반적으로 식생형에 따라 상수로 할당됨. 특히 이렇게 할당된 상수들이 현장 관측보다 현저히 낮은

값들이 최근에 보고됨 (Rogers et al 2017). 한편, Vcmax는 시간적으로도 변이가 큰 것으로 널리 보고됨 (Wilson et al 2001).

- 따라서, 본 연구에서는 최적성 이론(optimality theory)에 기반하여 시공간적으로 변하는 Vcmax 입력자료를 구축. 일 단위 대신 생장 기간에 대한 최적화 이론 적용하고, 이 생장기 평균 Vcmax에 보정된 온도를 적용 (Fig. 18.; Fig. 19)

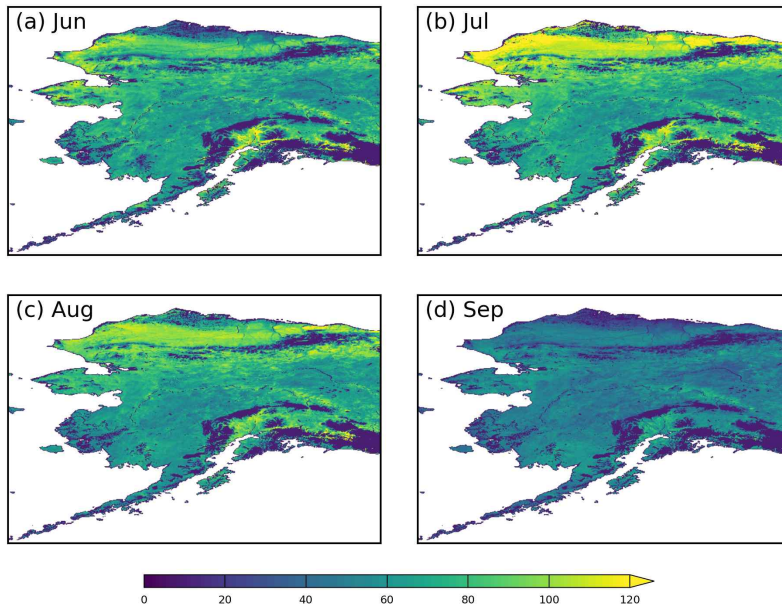


Fig. 18. Average Vcmax25 from 2001 to 2016. a) June b) July c) August d) September

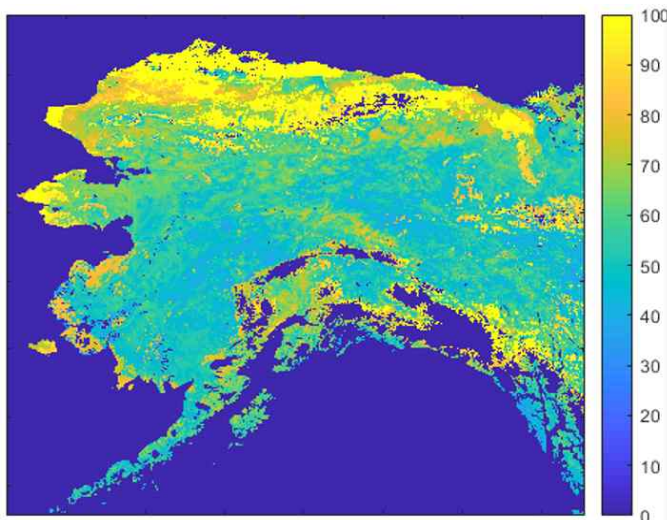


Fig. 19. Improved Vcmax map (umol/m2/s)

- 엽면적 지수를 경관 단위에서 군락 단위의 엽면적지수와 광합성 유효복사를 구함.

- 공간 해상도가 높아진 엽면적지수로 일 단위 엽면적지수 자료를 향상.
- 이렇게 모수화한 Vcmax를 사용하여 산출한 BESS 모델의 GPP를 앞서 비교한 플렉스 네트워크 타워 위치를 포함한 지역에 적용.
- 기존 지면모형들에서 사용하던 상숫값들보다 전반적으로 높은 값들이 도출되었으며 시공간적인 변화도 모사할 수 있게 됨 (Fig. 20.).

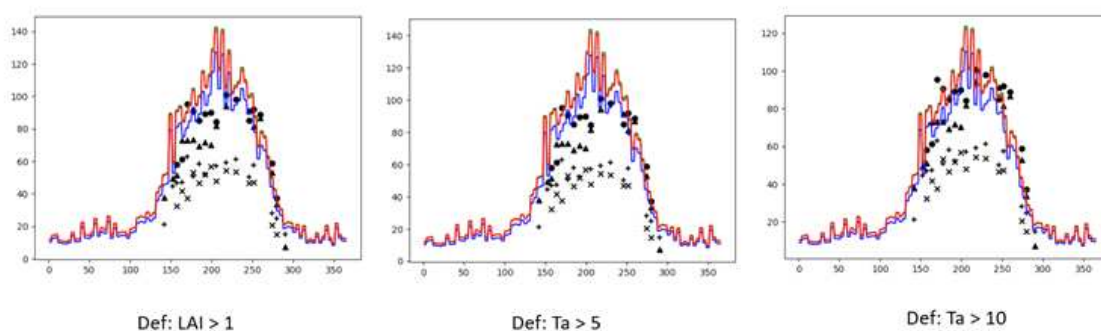


Fig. 20. Model example over DBF on 2014 (LAI: Leaf area index, Ta: air temperature)

3. BESS 모델과 비교할 모델 선정 및 자료 확보

- BESS 모형의 결과물과 다른 모형의 플렉스 지도들(MODIS, FLUXCOM, SVR)과 비교하여 평가 (Table 5.)
- Moderate Imaging Spectroradiometer (MOD17A). MODIS GPP는 8일 간격인 1km 공간 해상도에서 총일차생산량을 계산하기 위해 light use efficiency(LUE) 모델 (Running et al. 2004)을 이용함. 이 LUE 모델은 총일차생산량이 흡수된 광합성유효방사 (absorbed photosynthetically active radiation, APAR)과 직접 연관이 있다고 가정함. 그리고 Plant functional type(PFT)에 의존한 look-up table을 참고하여 LUE의 최댓값을 적용함. MOD15A2 fPAR 자료와 LUE방법을 이용하여 식물의 수관에서 복사에너지가 투과하고 광합성 하는 과정을 모델링함.
- Support vector regression(SVR). SVR 기반의 GPP는 8일 간격 1/30도 공간해상도이며 (Ueyama et al. (2013a) 자료를 이용함. SVR은 비선형 회귀를 선형 회귀로 변환하는 기계학습 커널 방법의 하나임. 21개 현장에서 에디공분산 시스템으로 관측한 자료를 위성영상과 격자형 재분석 기후자료(Japanese Re-Analysis 25 years - JRA25)를 바탕으로 upscaling함.
- FLUXCOM GPP는 8일 간격 1/12도 공간해상도를 가지며 11개의 머신러닝 기법(11가지 기법은 네 가지로 분류될 수 있음. model tree ensembles, multiple adaptive regression splines, artificial neural network, and kernel method)을 앙상블 하여 만듦. FLUXCOM은 224개 현장 관측과 위성영상, 기후데이터를 합친 FLUXNET La Thuile synthesis 데이터를 이용함.

Table 5. Models for the evaluation (MODIS, SVR, FLUXCOM)

	MODIS	SVR	FLUXCOM
Type of Approach	Semi-empirical	Machine-learning	Machine-learning
Gross Primary Production	Light Use Efficiency PFT-dependent Look-up Table (MOD17A2)	Support Vector Regression from 21 eddy covariance sites	Random Forest, Model Tree Ensemble, Multivariate Regression Splines, Artificial Neural Network, Group Method of Data Handling, Support Vector Regression, Kernel Ridge Regression, Gaussian process regression
Spatial Resolution (°) and Range	1/100 ° Global	1/30 ° Alaska	1/12 ° Global
Temporal Resolution and Range	8 Day 2000-2015	8 Day 2000-2011	8 Day 2001-2012
Climate Dataset	NCEP/NCAR Reanalysis II	Japanese Reanalysis JRA25	ERA-Interim
Radiation Dataset (Spatial resolution)	Global Modeling and Assimilation Office (1 ° x 1.15 °)	JRA 25 (1.1°)	ERA-Interim (0.75°)
MODIS Input Products	Land Surface Temperature (MOD11A1) Leaf Area Index and fPAR(MOD 15A2)		
Other MODIS Input Products		Surface reflectance -GR (MOD09A2)	NDVI & EVI (MOD13A2) Bidirectional Reflectance Distribution Function (MCD43A2/4)
Landcover	Landcover (MCD12A1)	Alaska Geospatial Data Clearinghouse	
Reference	(Running et al., 2004, Zhao et al., 2006)	(Ueyama et al., 2013)	(Tramontana et al., 2016)

4. BESS 모델의 플럭스 지도와 다른 모델의 플럭스 지도와 비교평가

- BESS 모형의 결과물과 다른 모형(MODIS, FLUXCOM, SVR)의 결과물이 현장 flux자료와 비교하여 성능 확인 (Fig. 21. 총일차생산량; Fig. 22. 증발산)
- 모델 간의 비교를 위해 2018년도 BESS 모델 평가 및 향상에 이용된 플럭스 자료를 이용.
- 토지 피복별 BESS 모델의 성능 평가 (Table 6.)

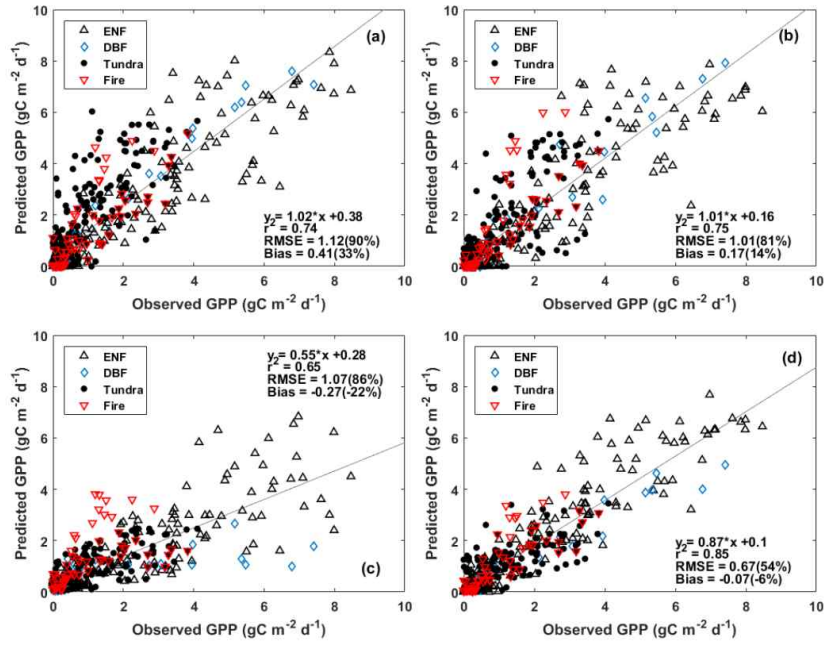


Fig. 21. GPP and flux data in each model (a) BESS, (b) MODIS, (c) SVR, (d) FLUXCOM

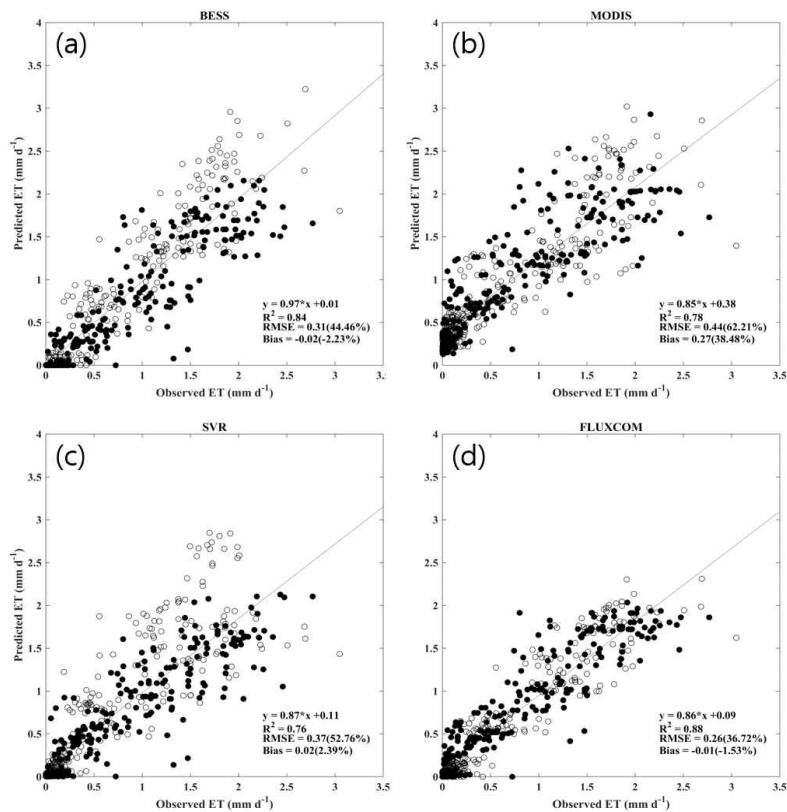


Fig. 22. ET and flux data in each model (a) BESS, (b) MODIS, (c) SVR, (d) FLUXCOM

Table 6 The performance of each model over each plant functional type

PFT	Sites		BESS GPP		MODIS GPP		SVR GPP		FLUXCOM GPP				
		r^2	RMSE	Bias	r^2	RMSE	Bias	r^2	RMSE	Bias	r^2	RMSE	Bias
			(rRMSE)	(rBias)		(rRMSE)	(rBias)		(rRMSE)	(rBias)		(rRMSE)	(rBias)
ENF	6	0.82	1.01 (55%)	0.08 (4%)	0.81	1.06 (57%)	-0.06 (-3.2%)	0.75	1.29 (70%)	-0.55 (-30%)	0.88	0.77 (41%)	-0.01 (-5%)
DBF	1	0.93	0.68 (41%)	0.35 (21%)	0.95	0.57 (38%)	0.08 (5%)	0.54	1.9 (125%)	-0.85 (-56%)	0.96	0.86 (54%)	-0.42 (-28%)
Tundra	7	0.69	1.25 (184%)	0.67 (99%)	0.66	0.90 (151%)	0.24 (40%)	0.66	0.50 (85%)	-0.07 (-11%)	0.65	0.50 (85%)	-0.05 (-8%)
Fire	3	0.65	1.04 (95%)	0.51 (46%)	0.65	1.10 (106%)	0.39 (38%)	0.31	1.01 (98%)	-0.24 (23%)	0.68	0.66 (63%)	0.09 (8.7%)
Overall	17	0.74	1.12 (90%)	0.41 (33%)	0.75	1.01 (81%)	0.17 (14%)	0.65	1.07 (86%)	-0.27 (-22%)	0.85	0.69 (54%)	-0.07 (-6%)

바. BESS를 이용한 탄소플럭스 지도 제작

- BESS GPP(Gross primary production, 총일차생산량) (Fig. 23.) 과 BESS ET(Evapotranspiration, 증발산) 제작 (8일 간격 1km 공간해상도)
- 입력자료는 ~200TB정도 많은 저장공간이 필요하며, 이를 계산하기 위해서 연산속도가 높은 서버 사용이 필수임.
- 현재 본 연구소가 보유한 리눅스 계산용 스토리지 서버를 이용함. 각각의 서버에 있는 자료를 서로 읽고 저장하며 연산하는 과정으로 BESS 모형을 구동함.

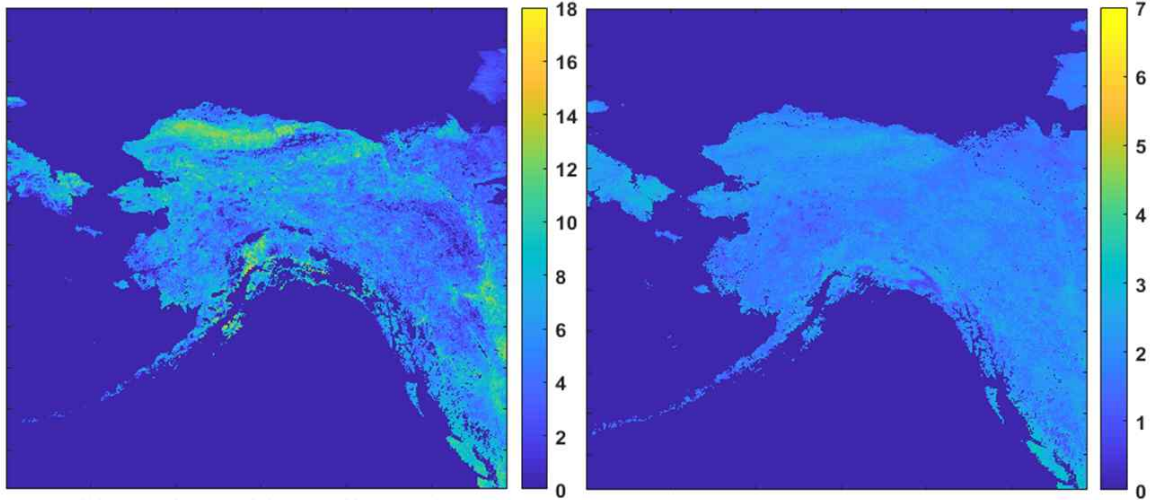


Fig. 23. BESS ET (mm/d)(Left) and BESS GPP(gC/m2/d)(Right) (July 2015)

- 제작된 BESS GPP와 BESS ET 지도를 극지방에 적합한 지도로 투영. 적도 중심의 투영법으로 지도를 제작할 경우 극지방을 나타낼 수 없는 부분이 생기기에 극지방을 중심으로 투영한 지도를 제작하면 차후 지도를 이용한 시공간 패턴 분석에 쉬울 거라 판단 (Fig. 24.).

*참고, Universal Polar Stereo graphic(UPS)은 평사도법(Stereographic projection)의 특수한 경우로 일반적으로 사용되는 Universal Transverse Mercator (UTM) 투영계의 극지방에 대한 공조로 만들어짐

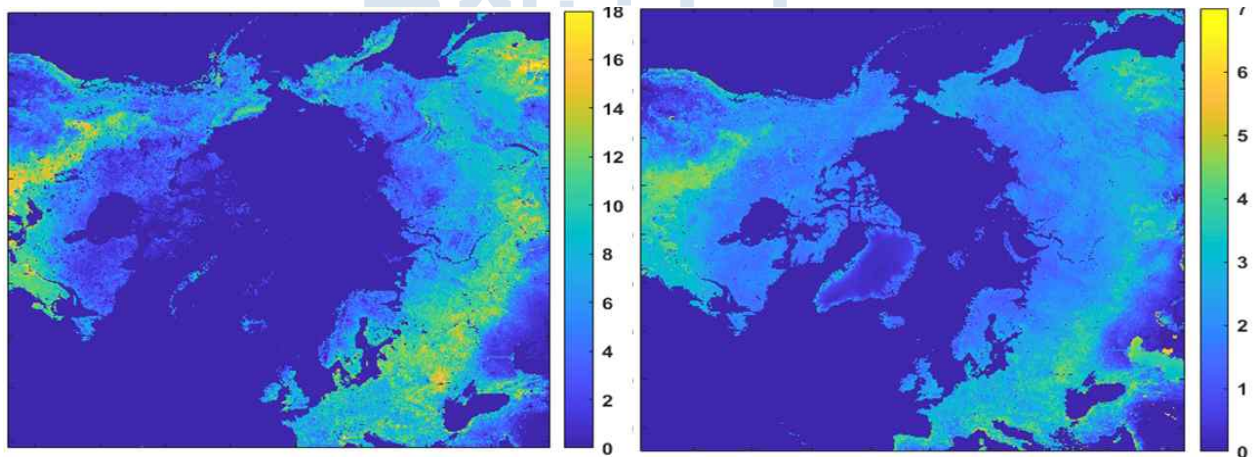


Fig 24 BESS ET (mm/d)(Left) and BESS GPP(gC/m2/d)(Right) (July 2015)

사. 시공간 패턴 분석

- 시공간 패턴을 일으키는 요인을 선별하여 각 요인과 탄소 및 물 플럭스의 상관관계를 구함.
- 잠재적인 공간패턴 조절요인을 강수량, 대기 온도, 단파복사로 예측하고, 각 토지 피폭별 조절요인들이 얼마나 패턴에 영향을 주는지 파악함. 토지 피복 중 ‘화재’는 화재에 의해 소실된 생태계와 이후 천이된 생태계가 탄소 플럭스와 위성 관측 사이의 관계에서 극명하게 다른 피복임 (Randerson et al., 2006; Ueyama et al., 2013b Welp et al., 2007) (Fig. 25.).

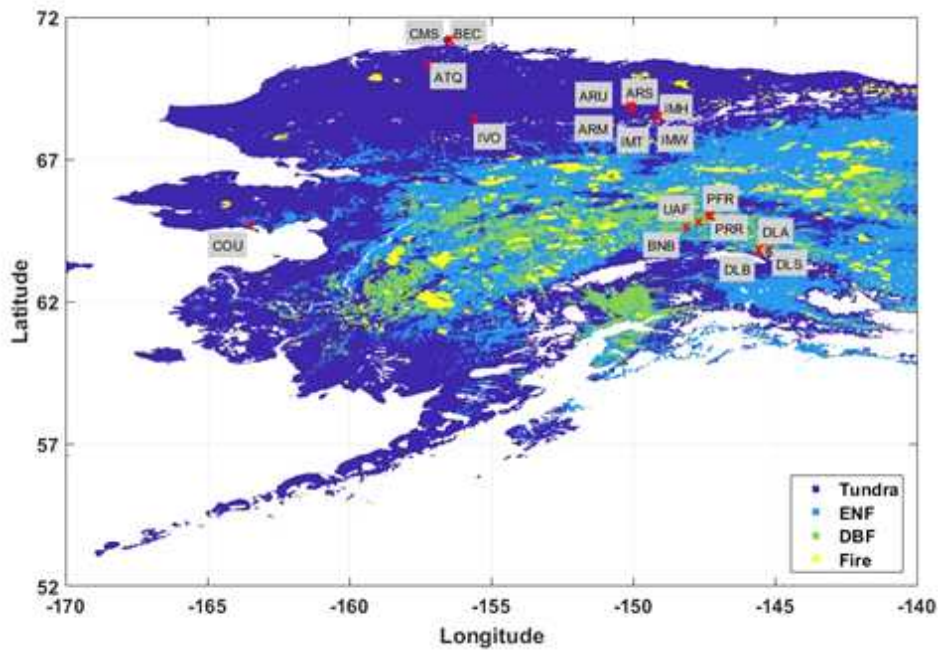


Fig. 25. The location of flux tower and its plant functional type (PFT)

- 공간분석을 통해 알래스카 탄소와 물 플럭스의 연간변동에 영향을 주는 지역을 알아냄 (Fig. 26.)

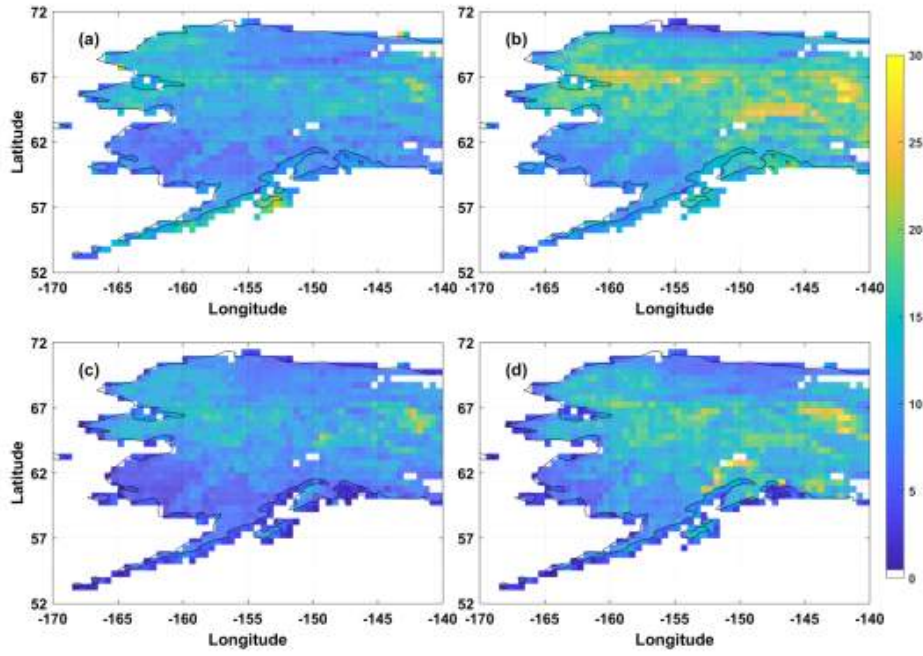


Fig. 26. Relative contribution (%) for inter-annual variation of GPP
 (a) BESS, (b) MODIS, (c) SVR, (d) FLUXCOM

- 식생별 현장의 값과 BESS모델의 총일차생산량의 상관관계를 분석 (Fig. 27.)

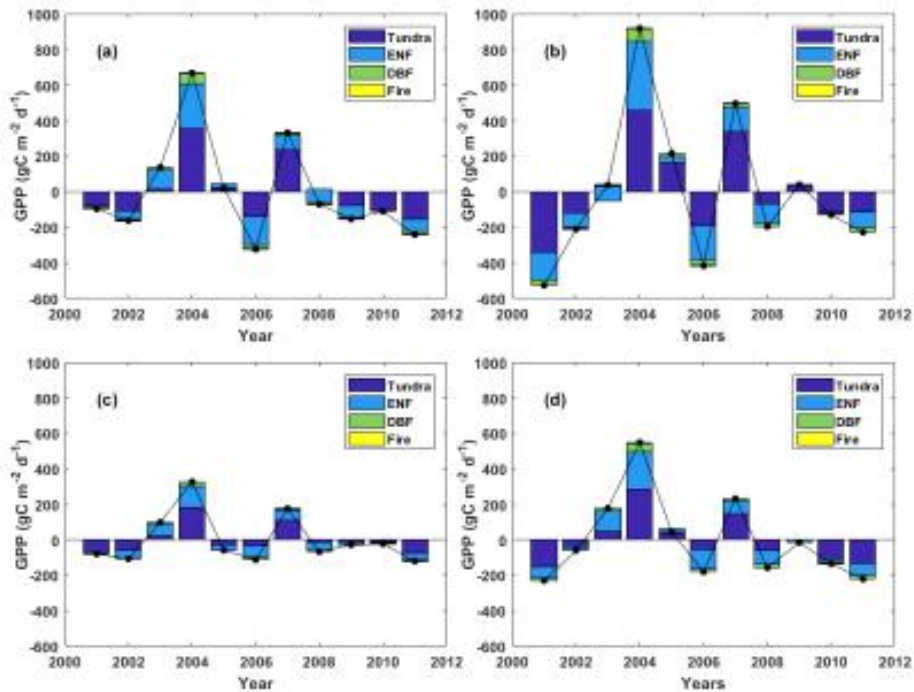


Fig. 27. Relative contribution of PFT in annual GPP (a) BESS (b) MODIS (c) SVR (d) FLUXCOM

- 시간에 따른 공간패턴 분석은 경년변동 (Inter-annual variation) 정도를 확인하여 파악함 (Fig. 28.). 공간패턴 조절요인이 경년변동이 얼마나 영향을 주는지 파악하여 시공간 패턴을 조절하는 인자를 지도로 제시 (Fig. 29.).

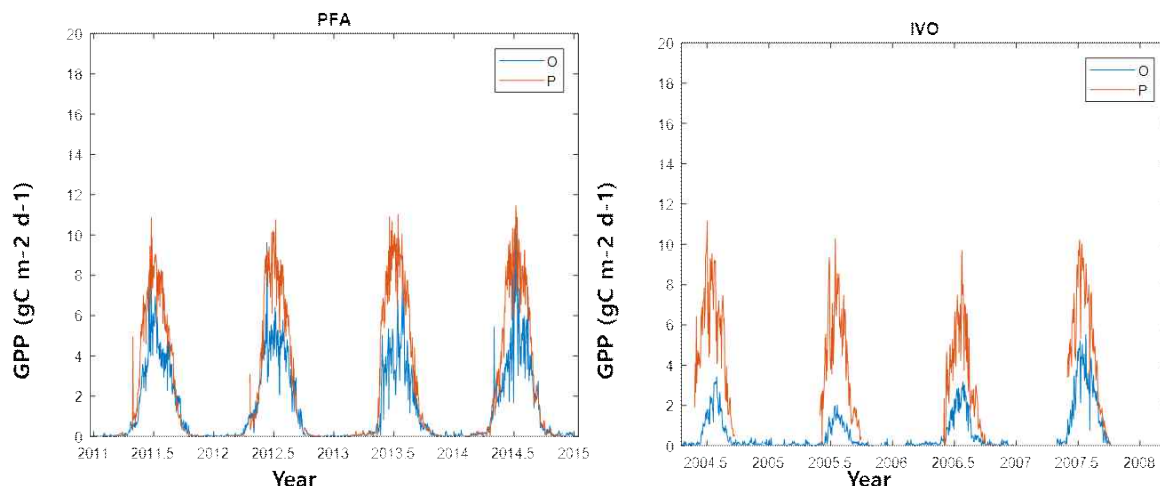


Fig. 28. Observed GPP (O: blue) and BESS GPP (P; orange) over PFA(DBF) and IVO(Tundra)

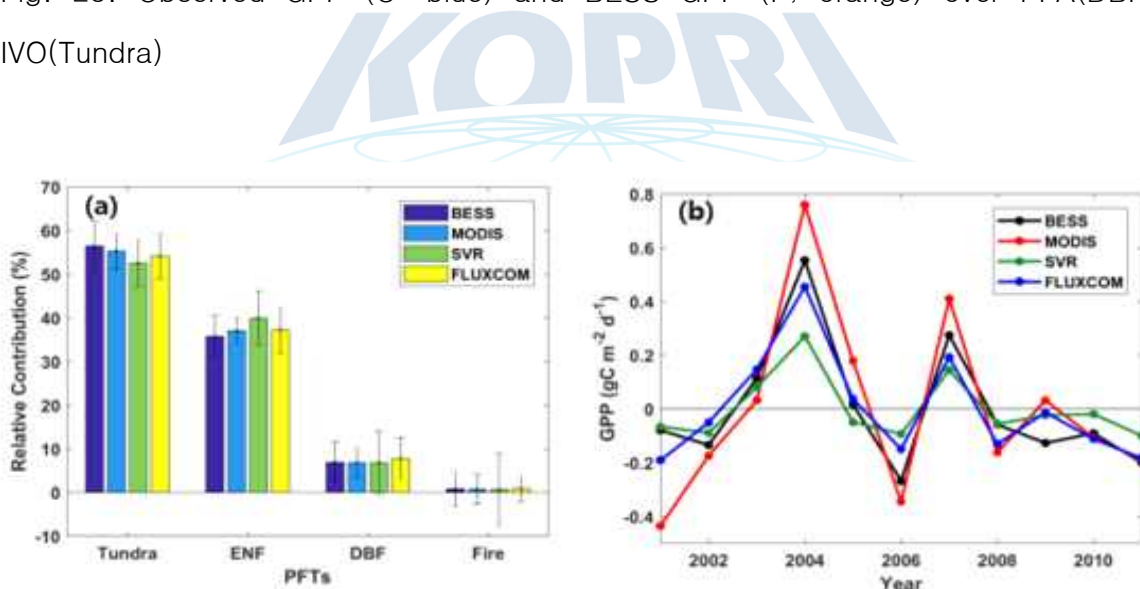


Fig. 29. (a) Cumulated contribution of GPP in PFT to interannual variation, (b) Annual GPP variation.

- 연간 변화를 조절하는 잠재적 요인으로 세가지 (대기온도 T_a , 강수량 Precipitation, 일사량 R_g) 선정함. 이를 알래스카 전체와 각 토지피복별(활엽수림 DBF, 침엽수림 ENF, 화재 Fire, 툰드라 Tundra)로 연간 변화를 조절하는 인자를 분석함(Fig. 30.). 이 중 대기온도가 토지피복과 상관없이 연간변화를 가장 잘 설명하는 요인이라는 것을 알아냄.

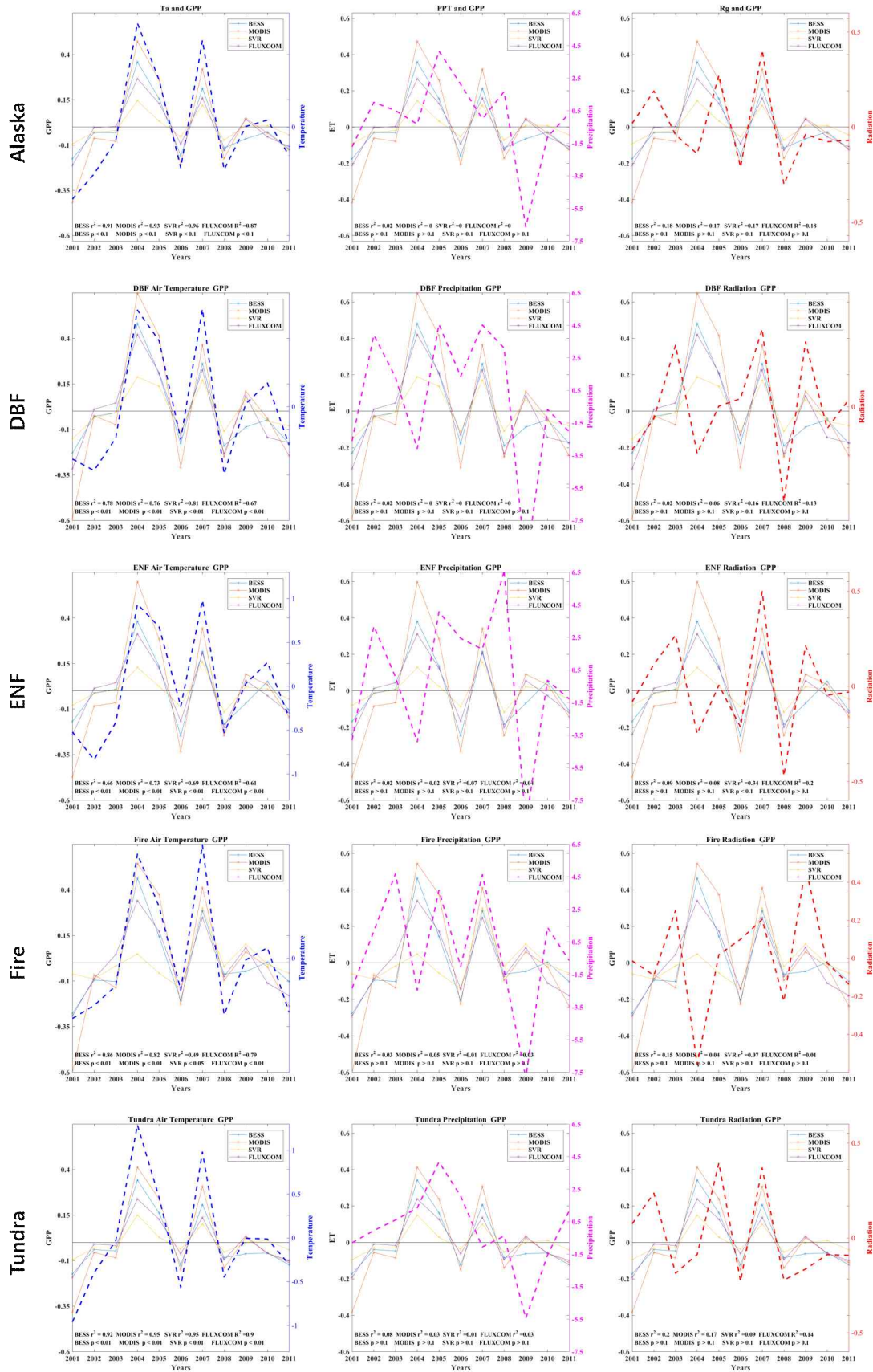


Fig. 30. Evaluation of potential factors in inter-annual carbon flux changes over each land cover

- 최소자승법을 이용하여 공간패턴 조절하는 잠재적 요인을 찾음. 알래스카 지역의 연간 총 일차생산량의 변화는 주로 대기온도와 강우량에 의해 조절 되었음. 하지만 대기온도와 강우량으로 설명되지 않는 지역이 있음. (Fig. 31.:blue circle)

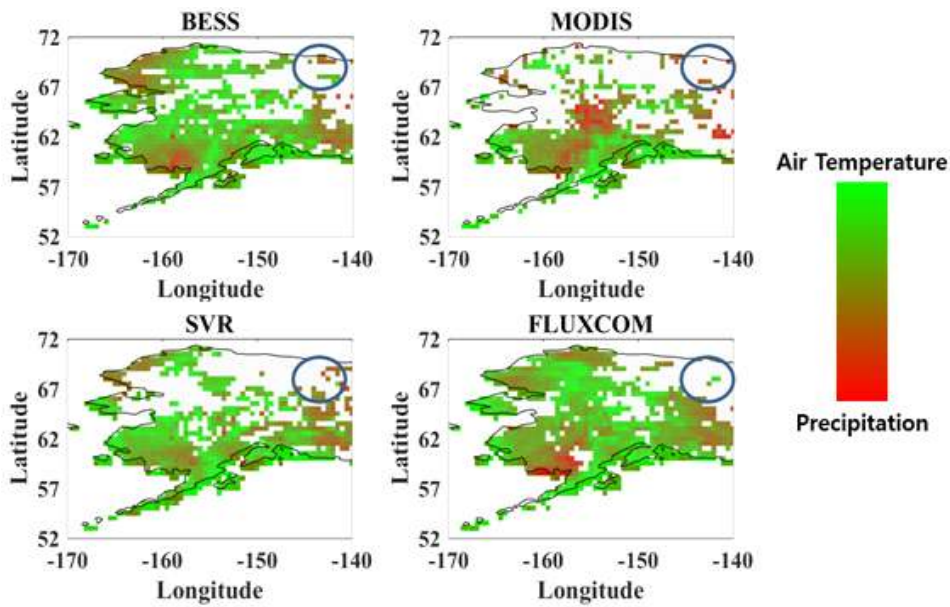


Fig. 31. Sensitivity of annual GPP by air Temperature and Precipitation

- 대기온도와 강우량으로 설명할 수 없는 총일차생산량의 공간패턴은 성장기간(LOS)를 공간패턴을 설명하는 잠재적 요인을 추가하여 설명할 수 있음(Fig. 32.: circle)

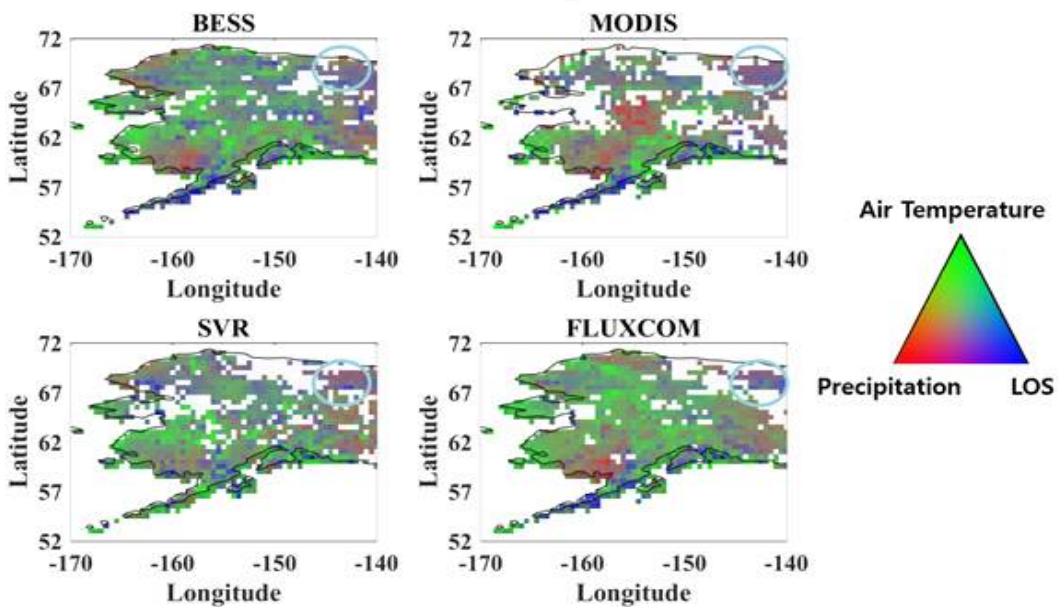


Fig. 32. Sensitivity of annual GPP by air Temperature, Precipitation, and length of season (LOS)

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성하며, 연구개발과제의 특성에 따라 수정이 가능합니다)

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계	2단계	계	가중치 (%)
			(2016~2017)	(2018~2021)		
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	논문 [SCIE, 평균 IF: 8.82]	목표(단계별)	1	1	2	
		실적(누적)	1	1	2	
	학술발표	목표(단계별)	4	6	12	
		실적(누적)	8	6	14	
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	인력양성 (석사)	목표(단계별)	1	1	2	
		실적(누적)	1	1	2	
	국제협력	목표(단계별)	1	1	2	
		실적(누적)	2	1	3	
계			7	9	16	
			12	9	21	

* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신제품 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.

* 2) 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 설계 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다

(연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

(3) 세부 정량적 연구개발성과(해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 증빙자료를 별도 첨부해야 합니다)

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000	Remote Sensing of Environment	류영렬	204	국외	Elsevier	SCIE	2018.01	0034-4257	50 %
2	An optimality-based model explains seasonal variation in C3 plant photosynthetic capacity	Global Change Biology	Chongyan Jian, 류영렬	26	국외	Elsevier	SCIE	2020.07	1365-2486	10 %

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Integrated Carbon Observation System (ICOS)	황여름	2016.09.27	Helsinki	핀란드
2	American Geophysical Union (AGU)	이제인	2016.12.13	San Francisco	미국
3	American Geophysical Union (AGU)	김소운	2016.12.14	San Francisco	미국
4	American Geophysical Union (AGU)	김종민	2016.12.16	San Francisco	미국
5	American Geophysical Union (AGU)	Chongya Jiang	2016.12.16	San Francisco	미국
6	Photosynthesis, carbon fixation and the environment	류영렬	2017.06.14	Berkeley	미국
7	University of Illinois	류영렬	2017.10.13	Champaign	미국
8	American Geophysical Union (AGU)	공주원	2017.12.13	New Orleans	미국
9	Potsdam GHG Flux Workshop 2018	공주원	2018.10.22	난징	중국
10	American Geophysical Union (AGU)	공주원	2018.12.12	Washington D.C.	미국
11	Living Planet	류영렬	2019.05.14	Milano	이탈리아
12	American Geophysical Union (AGU)	공주원	2019.12.09	San Francisco	미국

□ 기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

* 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

* 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.

* 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- * 3) 국내 또는 국외

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

사업화 계획 및 무역 수치 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
	국외				
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수치 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

고용 효과

구분			고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력		
		생산인력		
	개발 후	연구인력		
		생산인력		

비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	극지생태 계전문인 력	2018		1				1	1				
2	위성영상 분석인력	2019		1			1		1				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용
1	유치	2016.06.09	미국	석사	Atmospheric & Oceanic Science	외국연구자 유치; 오유미 석사
2	유치	2016.07.06	일본	박사	Industrial Science	외국연구자 유치; 김형준 박사
3	유치	2019.06.17.-21	미국	박사	Biometeorology	외국연구자 유치; Dennis Baldocchi 박사

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)



2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
현장 사이트에 분광계 설치 및 자동 관측 시스템 구축	LED 분광계 설치 및 유지하여 생물계절 모니터링	100
BESS의 핵심 파라미터 자료 관측	현장에서 식물의 분광 반사율 및 엽면적지수 관측	100
BESS product 생산을 위해 다중 인공위성 자료를 다운로드 및 전처리	MODIS 및 다른 위성 영상, 총 35개를 BESS 입력 자료로 구축 완료	100
고위도 특성을 반영한 입력자료 구축	극궤도위성의 특성을 활용하여 MODIS의 가용한 모든 swath 다운로드	100
플렉스 타워 관측 자료 이용하여 BESS모형 평가 및 향상	극지연구소와 해외 플렉스 네트워크 자료 이용한 모형 평가하고 이를 바탕으로 모형 향상	100
2000-2018 년 기간 동안 1km 해상도, 8일 단위의 총광합성, 증발산 지도 제작	광합성과 증발산지도 제작	100
제작된 지도를 이용하여 탄소와 물 플렉스의 시공간 패턴 분석	공간 변이 이해 및 시간에 따른 추세 변화 분석	100
시공간 패턴 조절하는 주요 인자 분석	시공간 패턴을 조절하는 잠재적 인자를 분석하여 검증	100

- 평가의 착안점에 따른 목표달성도에 대한 자체평가

목표	평가의 착안점	자체평가
현장 사이트에 분광계 설치 및 자동 관측 시스템 구축	- LED 분광계 설치 및 유지 - 생물계절 모니터링	현장에 설치한 연속관측 시스템이 극한의 환경 속에서도 유지할 수 있도록, 새롭고 더 견고한 LED 분광계를 개발하였음. 또한 지형의 변화에 상관없이 관측방향이 일정할 수 있도록, 재설치함. 이를 바탕으로 향후 극지방의 관측시스템을 설치 및 유지하는데 기여가 가능함.
BESS의 핵심 파라미터 자료 관측	- 분광 반사율 관측 - 엽면적지수 관측	현장에 방문하여 다양한 센서로 1단위 분광 정보와 토양온도와 토영습도를 측정하였고 식물을 직접 스캔하여 엽면적을 구하는 과정

		을 통해, 극지방에서 엽면적과 분광정보의 상관관계를 파악할 수 있었음. 이 결과가 극지방에서 생물리기작모델의 성능을 높여줬음
BESS product 생산을 위해 다중 인공위성 자료를 다운로드 및 전처리	27개의 MODIS 위성 자료, 8개의 재분석 자료, 총 35개의 입력자료 다운로드 및 전처리	200TB이상이 되는 입력자료를 다운로드하고 전처리를 하여 상이한 위성 데이터 간의 일관성을 맞추려고 노력하였음. 또한 극재투영과 리샘플링을 통해 최적의 입력자료를 구축하려고 하였음
고위도 특성을 반영한 입력자료 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 태양의 고도각의 극값 제거 - 고위도 특성을 반영하며 투영계 표준화 및 영상합성(image fusion)으로 상호 보정 병행 	입력자료 중 MODIS와 같은 극궤도위성은 극지방에서 재방문빈도가 높으므로, 가용한 모든 자료를 다운로드한 이후, 0.05도 공간해상도로 재투영을 완료함. 하루에도 여러 번 관측하는 이점을 살리고, 자료들 간의 관측 시간 차이를 보완하기 위해 상호 보정을 병행하였으므로 입력자료의 가용한 자료를 모두사용하면서 자료의 일관성을 유지함.
플렉스 타워 관측 자료 이용하여 BESS모형 평가 및 향상	<ul style="list-style-type: none"> - 극지연구소와 해외 플렉스 네트워크 자료 이용한 모형 평가 - 평가를 바탕으로 모형 향상 	극지연구소의 안정적인 플렉스타워 관리와 타기관의 협력으로 현장자료를 수집할 수 있었음. 이런 현장자료를 가지고 BESS모형을 평가하였음. 현장자료를 이용한 평가가 국외 모델과 비교하였을 때의 성능을 확인할 수 있었음. 또한 최적화 이론을 사용한 Vcmax를 조절한 결과가 BESS모형의 성능을 향상시켰음.
2000-2018 년 기간 동안 1km 해상도, 8일 단위의 총광합성, 증발산 지도 제작	<ul style="list-style-type: none"> - 광합성 지도 제작 - 증발산 지도 제작 	긴 기간의 자료를 본 연구실 서버에 2000년부터 2018년까지 BESS Radiation을 입력자료로 사용하여 BESS GPP와 BESS ET 지도를 구축함. 방대한 자료를 효율적으로 관리하기 위해서, 파일형식과 저장형태를 최적화하였음. 이는 차후 연산과 저장의 효율을 위함.
제작된 지도를 이용하여 탄소와 물 플렉스의 시공간 패턴 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 공간 변이 이해 및 시간에 따른 추세 변화 분석 	제작된 지도를 바탕으로 연간 공간변이를 조절하는 지역을 확인함하고 특정 패턴을 나타내는 지역을 선별함. 또한 시간 변화에 연변동성을 확인함.
시공간 패턴 조절하는 주요 인자 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 인자 분석 	패턴을 나타내는 잠재적 요인으로 식생피복 대기온도, 강수량, 단파복사로 나누어 상호 분석

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성



5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

◆ BESS 입력 자료 수집

1. MODIS 위성 자료 수집

MODIS 대기 (Collection 6) 와 육지 (Collection 5) 자료들 및 4가지 다른 인공 위성 영상, 재평가된 자료 그리고 3 가지 보조 자료를 입력자료로 서버에 다운로드했으며 총 37개의 입력 자료를 2000 -2018년 사이 구축을 했다:

- MOD04_L2 일단위 에어로졸 (dark target and deep blue combined aerosol optical depth at 500m) 데이터, MOD6_L2 구름 (cloud optical thickness, cloud top pressure, cloud top temperature, surface pressure and surface temperature) 데이터 (Sayer et al. 2014)
- MOD/MYD07_L2 (total column precipitable water vapor and total ozone burden, atmospheric profile) 데이터, MOD11A1 일단위 토지 표면 온도 (land surface temperature) 데이터, MCD12Q1 토지 피복 타임 데이터 (Baum et al., 2012)
- MOD15A2 8일 간의 엽면적지수 (LAI) 데이터
- MCD43D61 알베도 데이터가 (Roman et al., 2009)

2. 기후 데이터

- 총광합성과 기온(Ta), 강수량 (PPT) 및 단파복사 (Rg)의 관계를 알기 위해 그리드 기후 데이터를 사용함.
- 기온과 강수량에 대해서는 월별 CRU (Climate Research Unit) TS2.31 Mean Temperature와 CRU T323 Precipitation 데이터 세트를 사용하였으며, 이는 0.5 °공간해상도로 일 단위 값을 기준으로 월단위로 그리드 된 데이터임(Harris et al., 2014)
- 기후 데이터 세트는 전세계에 분포된 4500개 이상의 기상 관측소를 기반으로 제작되었음.
- 단파장 복사 데이터는 BESS에서 제공하는 4일 간격의 5km 공간해상도 광합성 유효복사와 산란 유효 복사 데이터를 이용하였다. 이 단파장 복사 데이터는 대기복사투과 모델과 MODIS 대기 자료와 지상자료를 인공신경망으로 산출한 데이터임 (Ryu et al., 2018).
- 본 연구에서는 2001 년에서 2011 년 사이의 기간 동안 71.5 ° N에서 51.5 ° N 사이의 위도와 -170 ° W에서 140 ° W 사이의 경도를 가진 기후 변수 데이터 (CRU 대기 온도, CRU 강수량 및 BESS 단파 방사선)를 사용했음.

3. 토지피복 데이터

- 생태계 유형을 분류하기 위해 (Ueyama et al. (2013a))의 토지 피복자료를 사용함. 이 데이터는 알래스카 지리정보 데이터하우스(Alaska Geospatial Data Clearinghouse)의 자료를 네 가지 생태계로 분류함 (툰드라(Tundra 68%), 상록침엽수(ENF 26%), 낙엽활엽수(DBF 4%), 화재(Fire 0.9%))
- ‘화재’는 화재에 의해 소실된 생태계와 이후 천이된 생태계가 CO2 플럭스와 위성 관측 사이의 관계에서 극명하게 다른 토지피복임(Randerson et al., 2006; Ueyama et al. 2013b Welp et al., 2007).

◆ 플렉스타워 및 해외모델 자료 수집

1. 플렉스 네트워크 데이터 수집 범위

- 플렉스 네트워크 데이터 수집 범위는 알래스카 남동부 지역의 Panhandle을 제외한 북위 52도에서 72도 및 서경 140도에서 170도로 정의함.
- 알래스카는 기후와 식생 유형, 영구 동토층 분포를 근거로 북극과 알래스카 내부로 특징지어 구분 할 수 있음.
- 북극은 브룩스 산맥 북쪽에서 발견되며, 영구동토층이 있는 툰드라 식물로 덮여있음. (연평균 기온은 -12°C이고 연간 강수량은 100-130mm). 알래스카 내부는 알래스카 산맥의 북쪽과 브룩스 산맥의 남쪽에 위치하고, 불연속적인 영구동토층에 북부한대수림으로 이루어져 있음. (연평균 기온은 0°C ~ -5°C이고 연간 강수량은 300-460mm) (Shulski and Wendler, 2007).

2. 플렉스 데이터 선별

- 에디 공분산 플렉스 자료는 알래스카의 18개의 지역에서 수집됨 (Ueyama et al. (2013a)).
- 플렉스 타워 사이트는 알래스카의 다양한 대표생태계를 나타내는 위치에 있음. 13개 사이트에서는 겨울철과 성장기간의 자료가 있었고, 7개 사이트는 성장기간의 자료만 있었음. 한국 극지연구소에서 제공한 카운실(COU) 플렉스 자료를 포함한 총 22개의 자료 중 18개 사이트만 총광합성량(GPP)을 평가할 수 있었음. (wet sedge tundra (CMS, BEC and IMW), moist tussock tundra (COU, ATQ, IVO, IMT and ARU), heath tundra, (IMH), burnt tundra (ARM, ARS), black spruce forest (BNB, PRR, UAF and DLS), Aspen forest (DLA) and burned black spruce forest (PFR and DLB))

3. 플렉스 데이터 처리

- 모든 데이터는 표준화된 Gap-filling과 품질 관리, 플렉스 분할방법으로 처리되었음
- (Ueyama et al. (2013a))는 이상점과 스파이크 형 데이터를 수동으로 제거하고 Gap-filling과 플렉스 분할 방법에 대한 내용을 표에서 색인하고 비선형 회귀를 적용했음. 순생태계교환(NEE)에서 GPP와 생태계호흡을 분리하는 과정에서 빛이 없는 야간데이터를 사용하였지만 여름에는 거의 야간이 없기에 이를 인지하고 데이터를 사용함
- 야간 데이터는 북극 지역에 한정되어있어 호흡 모델의 성능이 다른 지역에 비해 덜 정확할 수 있음
- 2000 년에서 2011 년 사이의 SVR (Support Vector Regression) 모델을 사용하여 알래스카의 사이트 수준에서 지역 규모로 상향 조정되었음

4. 타 기관과의 협조

- 극지연구소 플렉스 관측팀 (박상중, 최태진 박사): 플렉스 타워에서 관측된 광합성과 증발량 자료를 이용하여 BESS를 평가하고 향상시킴
 - University of Alaska at Fairbanks (김용원 교수): 알래스카 놉 사이트의 식생의 구조와 기능에 대한 공동 연구 진행
 - University of Arkansas (Ben Runkle 교수): 알래스카 놉 사이트 주변에 플렉스 타워를 설치할 예정인데, 이 자료에 대한 공유 요청을 통한 BESS 모형을 정교하게 평가함
-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

○ 국제공동연구의 선도

- NGEE (Next Generation Ecosystem Experiments), ABoVE (Arctic-Boreal Vulnerability Experiment) 등 극지의 탄소와 물 순환에 대한 대형 과제들이 진행중임
- 극지연구소도 이러한 외국의 대형 과제들과 협력과 경쟁을 병행해야 하는 시점임
- 본 과제를 통해 제동될 20년간 1km 고해상도의 탄소와 물 플럭스 지도를 해외 연구팀에서 달성하지 못한 주제인
- 정확도 높은 탄소와 물 플럭스 지도를 바탕으로 극지 툰드라 어느 사이트에서라도 협력 여부가 가능할 것임

○ 기후변화에 따른 툰드라 생태계의 변화 이해

- 지구 온난화에 따른 생물계절의 변화, 그리고 탄소와 물 플럭스의 변화를 이해하는데 기여
- 기후변화에 따른 생태계 회복의 변화와 그에 따른 플럭스 변화 이해

구분	기대 효과
기술적 측면	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 자원 탐사 <ul style="list-style-type: none"> - MODIS 데이터를 활용하여 복사, 탄소 및 물 순환지도를 만들어 1km 해상도의 탄소와 물 플럭스 지도로부터 carbon sink hotspot등을 탐지할 수 있을 것으로 기대 ○ 지면모형 향상에 기여 <ul style="list-style-type: none"> - BESS모형 향상을 통한 극지 툰드라 지역의 탄소와 물 플럭스 예측력 높은 지면 모형 개발에 기여
경제적 산업적 측면	<ul style="list-style-type: none"> ○ 탄소 배출권 시장에 선도 대응 <ul style="list-style-type: none"> - 툰드라 광역 규모에서의 탄소 플럭스 정량화를 통해, 탄소 배출권 사업을 진단하고 예측하는데 기여 ○ 위성 산업 발전에 기여 <ul style="list-style-type: none"> - 현장에서 자동관측되는 분광반사율 자료를 이용하여 위성 영상의 반사율 정보를 평가 - 에디공분산에서 관측되는 탄소와 물 플럭스의 시계열 변화를 가장 잘 포착 할 수 있는 파장대 선정에 기여

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. 과학적 연구 성과 증빙자료	1) 논문 게재 (MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000)
	2) 논문 게재 (An optimality-based model explains seasonal variation in C3 plant photosynthetic capacity)
2. 참고 문헌	1)
	2)

1. 과학적 연구 성과 증빙자료

1) 논문 게재 (MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000)

Remote Sensing of Environment 204 (2018) 812–825



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse



MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000



Youngryel Ryu^{a,b,c,d,*}, Chongya Jiang^d, Hideki Kobayashi^e, Matteo Detto^f

^a Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea
^b Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Republic of Korea
^c Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Republic of Korea
^d Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Republic of Korea
^e Institute of Arctic Climate and Environment Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
^f Smithsonian Tropical Research Institute, Panama and Department of Ecology and Evolutionary Biology, Princeton University, USA

Acknowledgements

This research was funded by the National Research Foundation of Korea (NRF-2014R1A2A1A11051134) and (NRF-2016M1A5A1901789). HK was supported by JSPS grant no.16H02948. This work used data acquired and shared by the FLUXNET community, including these networks: AmeriFlux, AfriFlux, AsiaFlux, CarboAfrica, CarboEuropeIP, CarboItaly, CarboMont, ChinaFlux, Fluxnet-Canada, GreenGrass, ICOS, KoFlux, LBA, NECC, OzFlux-TERN, TCOS-Siberia, and USCCC. The FLUXNET data processing and harmonization was carried out by the ICOS Ecosystem Thematic Center, AmeriFlux Management Project and Fluxdata project of FLUXNET, with the support of CDIAC, and the OzFlux, ChinaFlux and AsiaFlux offices. We thank Dennis Baldocchi, Olivier Roupsard, and Arturo Sanchez-Lorenzo who shared their data.

2) 논문 게재 (An optimality-based model explains seasonal variation in C3 plant photosynthetic capacity)

Received: 5 March 2020 | Accepted: 18 May 2020
DOI: 10.1111/gcb.15276



PRIMARY RESEARCH ARTICLE

Global Change Biology | WILEY

An optimality-based model explains seasonal variation in C3 plant photosynthetic capacity

Chongya Jiang¹ | Youngryel Ryu¹ | Han Wang² | Trevor F. Keenan^{3,4}

¹Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

²Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing, China

³Climate and Ecosystem Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA

⁴Department of Environmental Science, Policy and Management, UC Berkeley, Berkeley, CA, USA

Correspondence

Chongya Jiang and Youngryel Ryu,
Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea.
Email: chongya.jiang@gmail.com (C.J.); ryuyr77@gmail.com (Y.R.)

Funding information

NASA Terrestrial Ecology Program IDS Award, Grant/Award Number: NNH17AE861; Korea Ministry of Environment, Grant/Award Number: 2019002760002; National Research Foundation of Korea, Grant/Award Number: NRF-2016M1A5A1901789 and NRF-2019R1A2C2084626; Seoul National University

Abstract

The maximum rate of carboxylation (V_{cmax}) is an essential leaf trait determining the photosynthetic capacity of plants. Existing approaches for estimating V_{cmax} at large scale mainly rely on empirical relationships with proxies such as leaf nitrogen/chlorophyll content or hyperspectral reflectance, or on complicated inverse models from gross primary production or solar-induced fluorescence. A novel mechanistic approach based on the assumption that plants optimize resource investment coordinating with environment and growth has been shown to accurately predict C3 plant V_{cmax} based on mean growing season environmental conditions. However, the ability of optimality theory to explain seasonal variation in V_{cmax} has not been fully investigated. Here, we adapt an optimality-based model to simulate daily $V_{cmax,25C}$ (V_{cmax} at a standardized temperature of 25°C) by incorporating the effects of antecedent environment, which affects current plant functioning, and dynamic light absorption, which coordinates with plant functioning. We then use seasonal $V_{cmax,25C}$ field measurements from 10 sites across diverse ecosystems to evaluate model performance. Overall, the model explains about 83% of the seasonal variation in C3 plant $V_{cmax,25C}$ across the 10 sites, with a medium root mean square error of $12.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, which suggests that seasonal changes in $V_{cmax,25C}$ are consistent with optimal plant function. We show that failing to account for acclimation to antecedent environment or coordination with dynamic light absorption dramatically decreases estimation accuracy. Our results show that optimality-based approach can accurately reproduce seasonal variation in canopy photosynthetic potential, and suggest that incorporating such theory into next-generation trait-based terrestrial biosphere models would improve predictions of global photosynthesis.

KEYWORDS

canopy structure, memory effect, optimality hypothesis, photosynthetic capacity, terrestrial biosphere model, V_{cmax}

2. 참고 문헌

Davidson, S., Santos, M., Sloan, V., Watts, J., Phoenix, G., Oechel, W., & Zona, D. (2016). Mapping Arctic Tundra Vegetation Communities Using Field Spectroscopy and Multispectral Satellite

Data in North Alaska, USA, Remote sensing 8, 978

Davidson, S., Santos, M., Sloan, V., Reuss-Schmidt, K., Phoenix, G., Oechel, W., & Zona, D. (2017). Upscaling CH₄ Fluxes Using High-Resolution Imagery in Arctic Tundra Ecosystems, Remote sensing 9, 1227

Elmendorf, S. C., et al. (2012). "Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time." *Ecol Lett* 15(2): 164–175.

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H., (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34(3): 623–642.

Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., Pastukhov, A., Rivkin, F., Marchenko, S., Romanovsky, V., & Kuhry, P. (2011). High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic, 116

Jiang, C. and Ryu, Y., (2016). Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS). *Remote Sensing of Environment*, 186: 528–547.

Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D., Arain, M.A., Arneeth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B.E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., & Williams, C. (2011). Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116

Lund, M., et al. (2009). "Variability in exchange of CO₂ across 12 northern peatland and tundra sites." *Global Change Biology*: no-no.

McGuire, A. D., et al. (2012). "An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions." *Biogeosciences* 9(8): 3185–3204.

Myers-Smith, I. H., et al. (2015). "Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome." *Nature Climate Change* 5(9): 887–891

Nauta, A. L., et al. (2014). "Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source." *Nature Climate Change* 5(1): 67–70.

Oechel W. C., et al. (1993). "Recent changes of the arctic tundra ecosystem from a net carbon dioxide sink to source." *Nature Lett.* 361: 520 – 523.

Ping, C.-L., et al. (2008). "High stocks of soil organic carbon in the North American Arctic region," *Nat. Geosci.*, 1, 615–619.

Stan Wullschleger, et al. (2015). "Next-Generation Ecosystem Experiments (NGEE Arctic Phase2)."

Kobayashi, H., Iwabuchi, H., (2008). A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape. *Remote Sens. Environ.* 112, 173–185

Ping, C.-L., et al. (2008). "High stocks of soil organic carbon in the North American Arctic region," *Nat. Geosci.*, 1, 615–619

Running, W. S., R. R. Nemani, F. A. Heinsch, M. Zhao, Reeves M and H. Hashimoto (2004). "A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production." *BioScience* 54(6): 547–560.

Ryu, Y., Baldocchi, D.D., Verfaillie, J., Ma, S., Falk, M., Ruiz-Mercado, Il, Hehn, T., Sonnentag, O. (2010). Testing the performance of a novel spectral reflectance sensor, built with light emitting diodes (LEDs), to monitor ecosystem metabolism, structure and function. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150, 1597–1606

Ryu, Y., Baldocchi, D. D., Kobayashi, H., Van Ingen, C., Li, J., Black, T. A., ... Roupsard, O. (2011). Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(4), 1–24. doi:10.1029/2011GB004053.1.

Ryu, Y., C. Jiang, H. Kobayashi and M. Detto (2017). "MODIS-derived global land products of shortwave radiation and diffuse and total photosynthetically active radiation at 5 km resolution from 2000." *Remote Sensing of Environment*.

Tape, K. D., et al. (2012). "Landscape Heterogeneity of Shrub Expansion in Arctic Alaska." *Ecosystems* 15(5): 711–724.

Tramontana, G., M. Jung, C. R. Schwalm, K. Ichii, G. Camps-Valls, B. Ráduly, M. Reichstein, M. A. Arain, A. Cescatti, G. Kiely, L. Merbold, P. Serrano-Ortiz, S. Sickert, S. Wolf and D. Papale (2016). "Predicting carbon dioxide and energy fluxes across global FLUXNET sites with regression algorithms." *Biogeosciences* 13(14): 4291–4313. DOI: 10.5194/bg-13-4291-2016

Ueyama, M., et al. (2013). "Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 118(3): 1266–1281..

Ueyama M., et al. (2013). "Growing season and spatial variations of carbon fluxes of Arctic and boreal ecosystems of Alaska." *Ecological Applications* 23(8): 1798–1816.

Schuur, E.A. et al., (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546): 171–9.

Shulski, M. and Wendler, G., (2007). *The Climate of Alaska*. University of Alaska Press, Fairbanks, Alaska, USA: 216.

Sweet, S. K., et al. (2015). "Greater deciduous shrub abundance extends tundra peak season and increases modeled net CO₂ uptake." *GlobChangBiol* 21(6): 2394–2409.

Williamson, S. N., et al. (2016). "Phenology and species determine growing-season albedo increase at the altitudinal limit of shrub growth in the sub-Arctic." *GlobChangBiol*.

Zhao, M., S. W. Running and R. R. Nemani (2006). "Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses." *Journal of Geophysical Research* 111(G1). DOI: 10.1029/2004jg000004

주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업 ‘위성 기반의 툰드라 지역 탄소와 물 플럭스 시공간 패턴 분석’연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부 (극지연구소)에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.