

개별기반 지역생태모형
(Ecosystem Demography Model) 활용
극지방 관목확장 과정 및 영향 이해

Understanding the process and impact of
polar shrub expansion
using the Ecosystem Demography Model



연세대학교



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “국내 학 . 연 극지연구진흥프로그램(PAP사업)”에 관한 연구 “개별기반 지역생태모형(Ecosystem Demography Model) 활용 극지방 관목 확장 과정 및 영향 이해” 과제의 최종보고서(보고서명: 개별기반 지역생태모형(Ecosystem Demography Model) 활용 극지방 관목 확장 과정 및 영향 이해)로 제출합니다.



연구기관명 : 연세대학교

연구책임자 : 김 연 주

참여연구원 : 김 지 현
왕 잔
김 정 빈
성 경 민
이 재 형
서 호 철
조 경 우
호 현 주



요 약 문

I. 제 목

개별기반 지역생태모형(Ecosystem Demography Model) 활용 극지방 관목 확장 과정 및 영향 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

개별기반 지역생태모형(Individual-based regional ecosystem model)인 Ecosystem Demography model version 2(ED2)를 알래스카 지역에서 구축하고, 이를 기반으로 최근 관측되고 있는 극지방 관목 성장 및 확장 관련 생태계 및 물순환, 탄소순환 과정을 고찰하는 것을 목표로 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

- ED2-툰드라 모형 체계 구축
 - 주요 사이트 기상, 수문, 지형, 식생 현장조사 및 플럭스 관측 자료를 수집하고 분석함
 - 선행 연구들을 바탕으로 식생 및 지면 과정 관련 주요 모수의 관측 범위에 대한 자료를 확보함
 - 주요 사이트 관측 자료를 활용하여 예비 수치실험을 수행하여 모형 모수를 최적화함
 - 성능 평가 결과에 따라 관련 모듈 개선을 수행하여 ED2-툰드라 모형을 구축함

- ED2-툰드라 모형 활용 알래스카 지역생태계 순환 모의
 - 알래스카 지역 전체의 기상, 수문, 지형, 식생 자료를 수집함
 - 다중 기후 조건(관측 온도 및 고정 온도)하에 ED2-툰드라 모형으로 수십년 규모의 수치실험을 수행함

- 관목 성장 및 확장과 기온상승의 상대적 역할 및 피드백에 대해 고찰함
- 관목 성장 및 확장으로 인한 생지화학 순환의 계절별 장기변화 추이를 고찰함

IV. 연구개발결과

- 지난 39년간(1979-2017년), 고위도에 위치한 두 사이트가 그보다 저위도에 위치한 사이트에 비해 낮은 반면 표준편차(39년간 연간변동)은 컸고, 통계적으로 유의미하게 상승한($p < 0.001$) 반면, 연강수량 모든 사이트에서 유의미하게 변하지 않음($p > 0.05$)
- 모형 모수 최적화 결과, 두 사이트(US-Atq, 극지연구소)의 타워에서 측정된 30분 간격 순생태계교환량(NEE)과 증발산(ET) 플럭스 변동의 48.7 - 76.8%를 모의 가능함(예외, 극지연구소 ET 플럭스 6%)
- 새로운 ED2 식생계절 모듈을 개발하여, 기존 ED2 식생계절 모듈보다 30분 간격 순생태계교환량(NEE) 플럭스 변동량의 3% 이상을 더 정확히 모의할 수 있음을 확인함
- 지난 21년간(1995-2016년), 알래스카 거의 전 지역에서 식생 흉고단면적(Basal area)은 증가한 반면($p < 0.001$), 엽면적지수(LAI)는 일부 지역(고위도 해안과 중부 내륙)에서만 강하게($p < 0.001$) 증가한 것으로 나타남
- 기온상승이 없는 조건에서도 관목 성장 및 확장의 장기변화는 알래스카 전 지역에서 뚜렷이 나타남($p < 0.001$)
- 최근 21년간 알래스카 지역의 기온상승은 관목 성장 및 확장에 영향이 없었거나, 혹은 성장을 억제하는 작용을 하였음을 의미함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 개별기반 지역생태모형(ED2)을 툰드라 지역에서 구축함으로써, 향후 기후변화에 따른 극지 생태계 반응을 예측하기 위한 모델링 프레임워크를 구축함
- 지난 20년간의 기후변화에 따른 극지방 관목 성장 및 확장의 장기변화 추이를 살펴봄으로써, 앞으로 예상되는 기후변화에 따른 극지방 생태계 변이를 추측하기 위한 과학적 이해도를 높임
- 극지방 관목 성장 및 확장으로 인한 생태계 및 물순환, 탄소순환의 영향 및 관련 피드백을 과학적으로 이해함

목 차

제 1 장 서론.....	5
제 1 절 연구개발의 목적.....	5
제 2 절 연구의 필요성 및 범위.....	6
제 3 절 연구 계획.....	16
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	17
제 1 절 국·내외 연구 현황.....	17
제 2 절 개별기반 지역생태모형(ED2).....	25
제 3 장 연구개발 내용 및 결과.....	34
제 1 절 연구개발 내용 및 방법.....	34
제 2 절 연구결과.....	54
제 3 절 요약 및 결론.....	84
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도.....	86
제 1 절 연구개발목표의 달성도.....	86
제 2 절 관련분야의 기술발전예의 대외기여도.....	89
제 5 장 연구개발결과의 활용계획.....	92
제 1 절 추가연구의 필요성.....	92
제 2 절 활용방안 및 기대효과.....	94
제 6 장 참고문헌.....	96
부 록.....	103
부 록 1 주요 사이트 기상자료.....	103
부 록 2 플렉스자료.....	115
부 록 3 식생모듈 소스코드.....	118



제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적

본 연구는 알래스카 극지방에서 개별기반 지역생태모형 (Individual-based regional ecosystem model)인 Ecosystem Demography model version 2(ED2)를 구축하고, 이를 기반으로 최근 관측되고 있는 극지방 관목 성장 및 확장과 관련한 생태계 및 물순환, 탄소순환 변화 과정을 고찰하는 것이 목적이며, 이를 위하여 다음과 같은 연구들을 진행하였다.

1. ED2-툰드라 체계 구축
2. ED2-툰드라 모형 활용 알래스카 관목 성장 및 확장 과정 분석
3. 관목 성장 및 확장 과정으로 인한 생지화학 순환의 계절적 변화 고찰

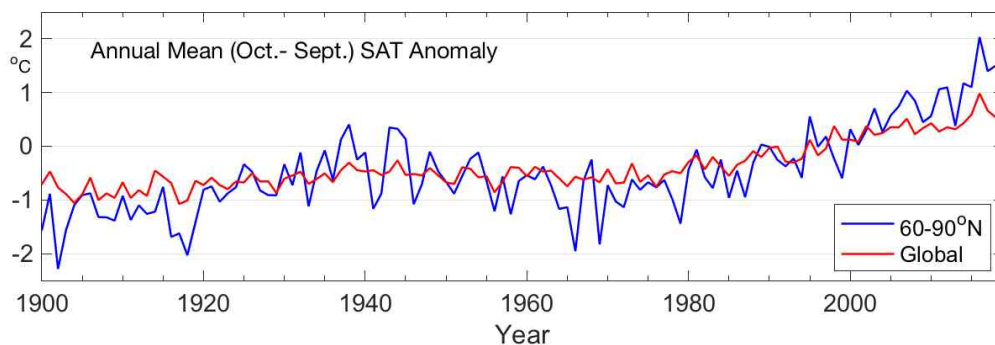
ED2-툰드라 체계를 구축하고, 이를 활용하여 기온상승 및 관목 성장 및 확장으로 인한 알래스카 툰드라 지역의 생지화학 순환의 변이를 추산하고 고찰하였다.

제 2 절 연구의 필요성 및 범위

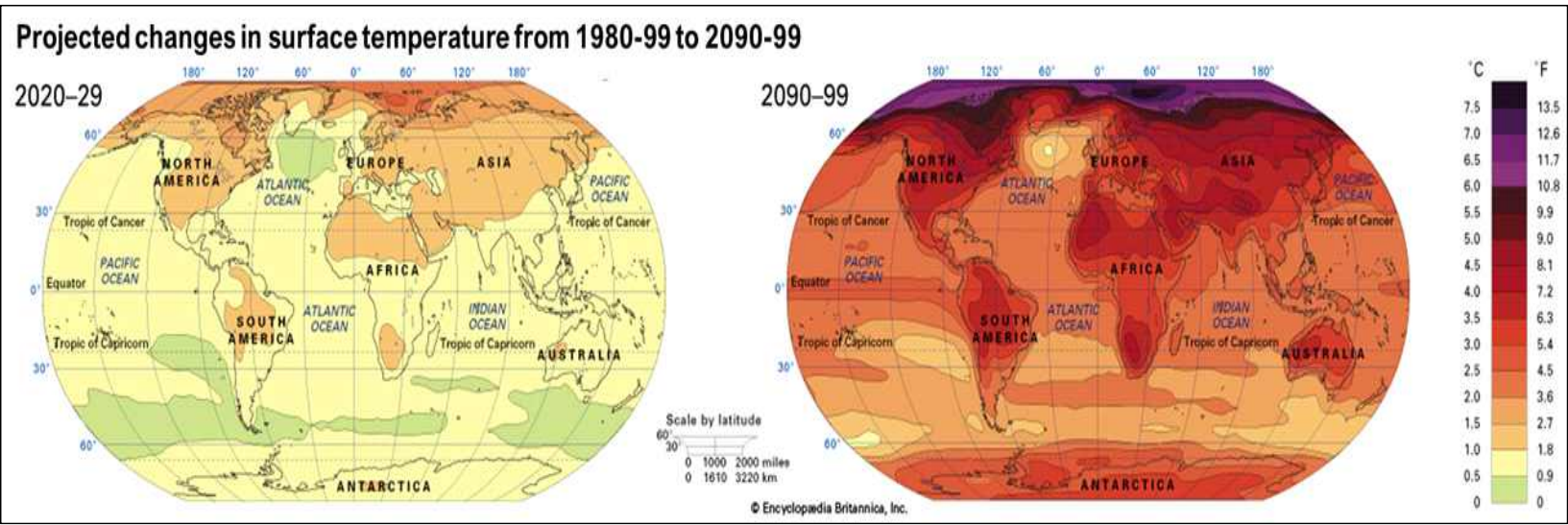
1. 극지방 툰드라 관목 확장 현상

지난 2016년과 2017년은 1900년 온도 관측 시작 이후로 극지방 온도가 평균 (1980-2010년) 온도 가장 높은 해 (약 1.7 °C)로 기록되었다(NOAA, 2018, 그림1). 전지구적 온난화에 비해 약 두 배의 강도로 극지방 기온이 상승하는 이러한 Arctic Amplification 현상에 대한 원인은 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 몇 가지 제시된 가설로는, 빙하와 적설의 감소에 따른 여름 반사율(albedo) 감소, 극지방 대기의 수분량 증가, 구름양 변화 등이 있다. 현재까지의 연구에 따르면, 이러한 Arctic Amplification이 계속될 경우, 고위도 지역은 21세기 말까지 1980년-1999년과 비교해 약 9°C까지 상승할 것으로 예측된다(그림2).

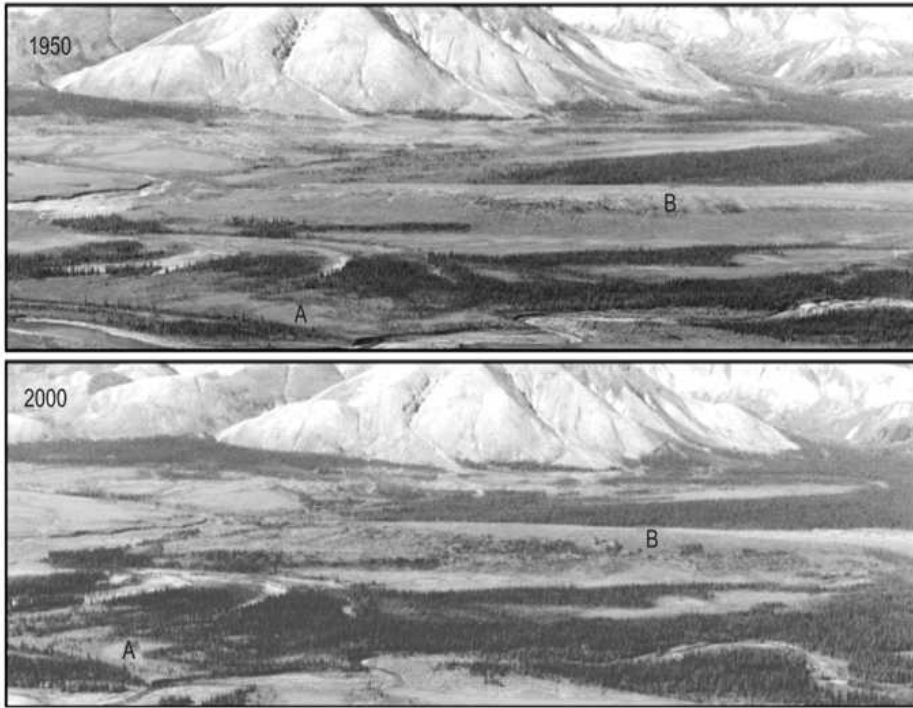
극지방 툰드라 생태계, 동토 탄소 배출 등은 온도상승에 대해 매우 민감한 과정으로 알려져 있다. Sturm et al. (2001)은 1949년과 1999년에 촬영한 66쌍의 사진을 비교하여, 36쌍의 사진에서 관목이 이전에 없던 지역으로 확장하였고, 관목의 높이와 흉고단면적(diameter)의 급격한 상승이 발생하였다고 보고하였다(그림3). Tape et al. (2006)는 202쌍의 사진 중 135쌍에서 지난 50년간 (1945-2002년) 유의미한 관목 확장(shrubification)이 일어났다고 분석하였다(그림4).



<그림1> 1981-2000년의 평균과 비교한 극지방(위도 60도 이상)과 전지구 연평균 지표면 이상온도(Surface Air Temperature, SAT, anomalies) (NOAA 2018)

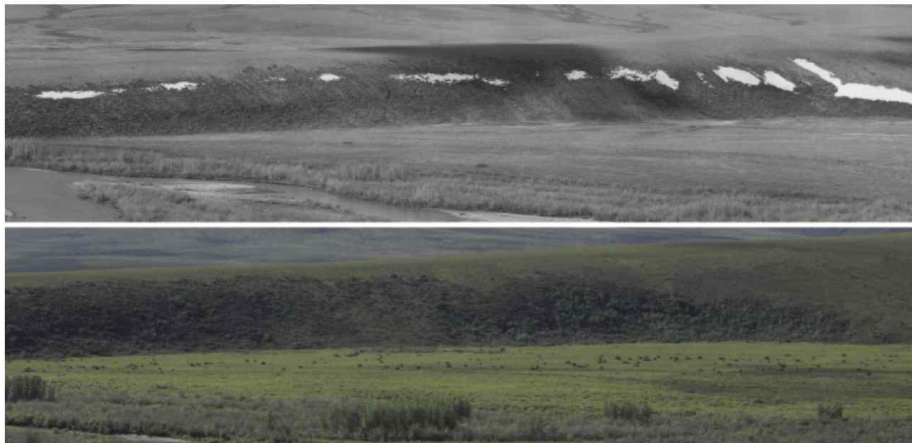


<그림2> 2020년대와 2090년대의 기온상승 예측량 (IPCC 2007)



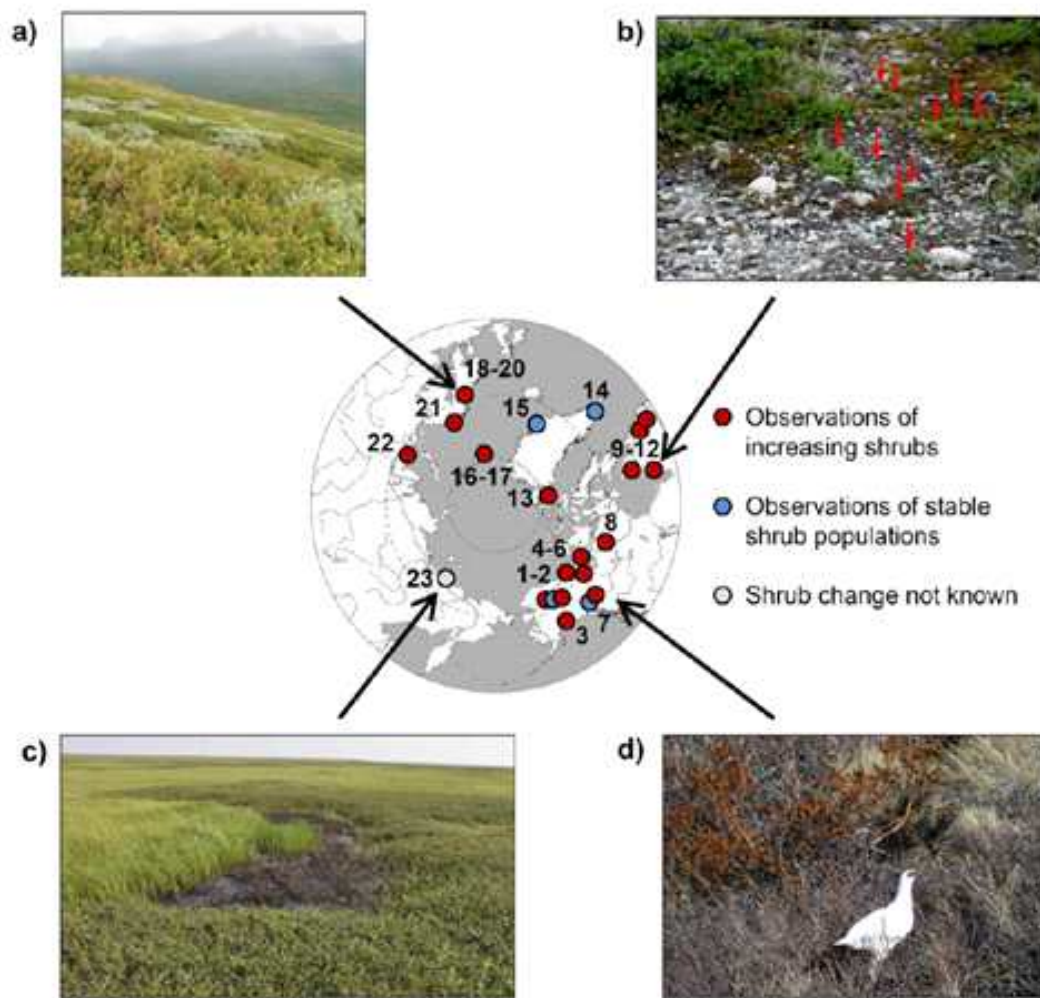
<그림3> 관목 확장의 예: Kugururok River in Alaska, USA
(Sturm et al., 2001)

극지연구소



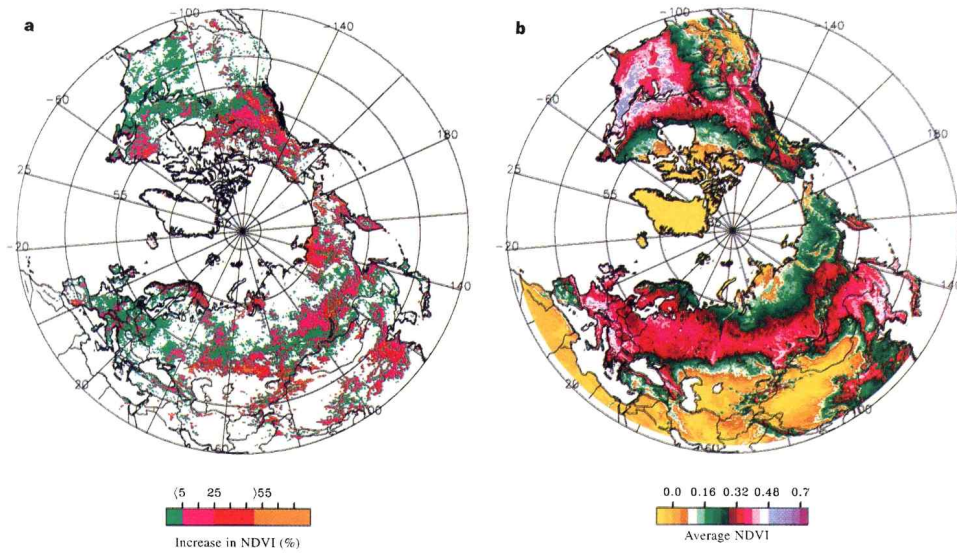
<그림4> 관목 확장의 예2: Chandler River in Alaska, USA
(Tape et al., 2006)

보다 구체적으로, 북부 스웨덴 해발 900m 산맥의 남향 경사면에서는 *Juniperus nana*의 지역확장과 *Salix glauca* 및 *Betula nana*의 성장증가에 대한 보고가 있었고(그림5a), 북부 퀘벡의 카리부 트레일에 *Betula glandulosa* 묘목의 성장이 관측되었다(그림5b). 반면, 토양수분 증가로 인해 기존 관목(*Betula nana*)은 고사하고 새로운 식생종(*Eriophorum*과 *Carex*)이 성장하는 경우도 북동부 시베리아에서 보고되었다(그림5c).

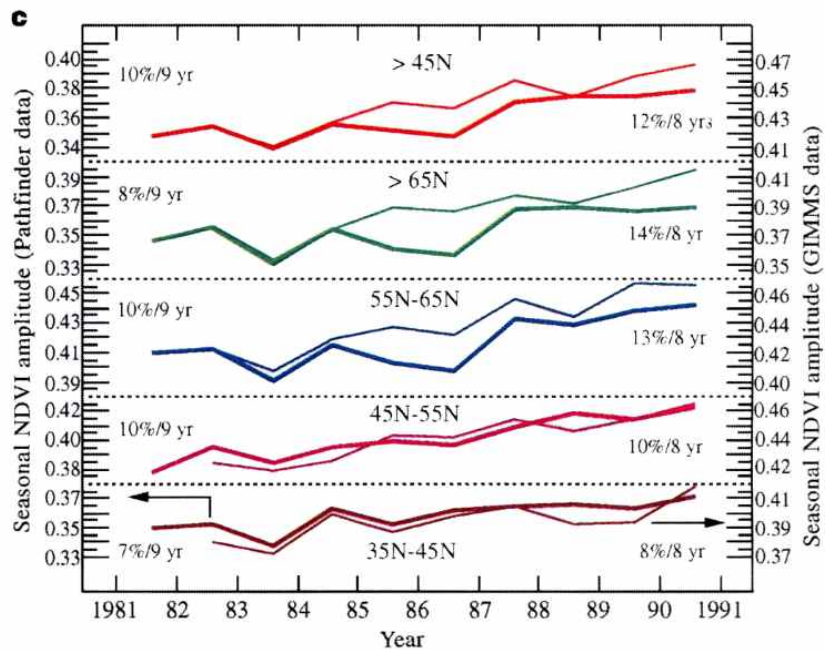


<그림5> Arctic tundra 지역내 관측된 관목 확장 위치 및 종류 (Myers-Smith et al., 2011)

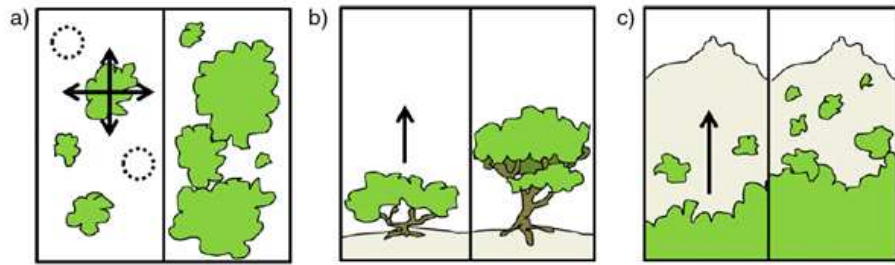
이러한 고위도 지역의 관목 확장(shrubification)은 2000년이전의 원격탐사 영상을 분석한 연구들에서도 마찬가지로 보고되었다. 일례로, Myneni et al. (1997)은 1982년에서 1990년 사이에 식생성장기간(growing season) 증가로



<그림6> 정규식생지수(NDVI) 증가폭(%)과 평균량 (Myneni et al., 1997)



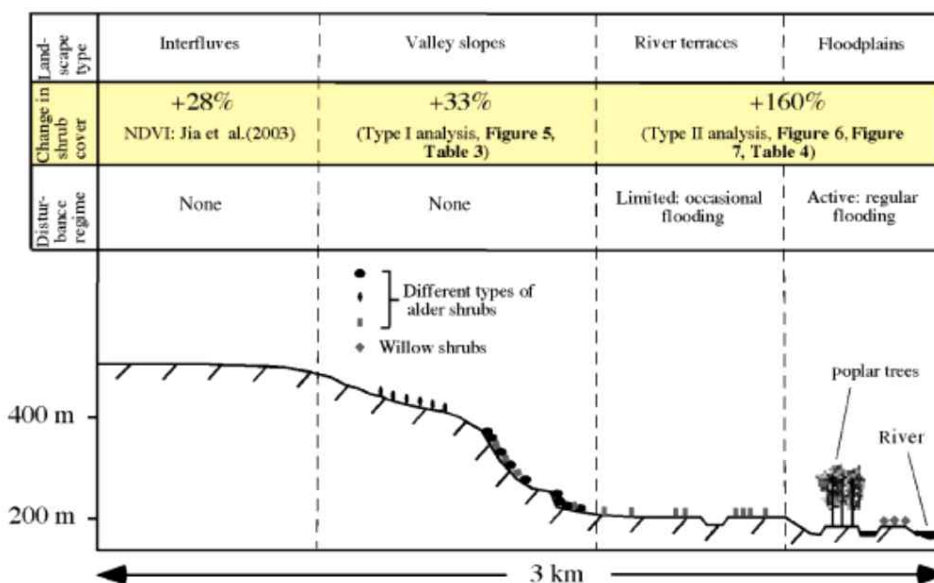
<그림7> 7-8월 평균 정규식생지수(NDVI)의 도별 증가추이 (Myneni et al., 1997)



<그림8> 관목 확장 과정의 도식도 (Myers-Smith et al., 2011)

인한 정규식생지수(NDVI) 증가량이 위도 45도 이상의 고위도 지역이 저위도 지역에 비해 3-6% 크다는 것을 보였다(그림6, 7).

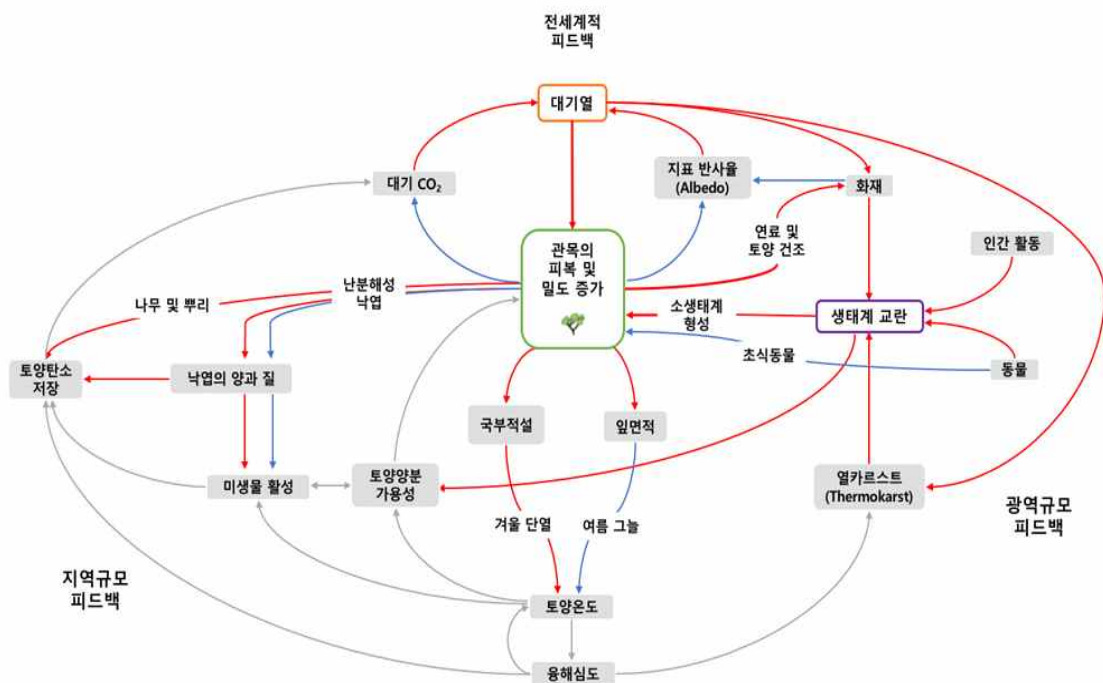
온난화로 인한 관목 확장은 크게 세 가지로 나뉜다: (1) 기존 관목 성장지역 내에서 관목 밀도 증가, (2) 관목 성장 속도 증가, (3) 국부적으로 관목 성장에 유리한 조건 형에 따른 성장지역 확장(그림8, Myers-Smith et al., 2011). 이러한 세 가지 경우의 관목 성장 및 확장은 대체로 동시에 일어나지만, 국부적 지형 조건에 따라서 다른 종류의 관목이 확장되거나, 관목 성장 속도가 다르게 증가하기도 한다(그림9, Tape et al., 2006). 선행 연구에 따르면, 하간 지대(interfluvial)에서는 관목 확장이 상대적으로 적게 발생한 한편, 계곡 경사면(valley slope)에서는 다양한



<그림9> Topographical 관목 확장 조건 도식도 (Tape et al., 2006)

종류의 관목(alder, willow, dwarf birch)의 눈에 띄는 확장이 보고되었다. 또한, 하안단구(river terrace)와 범람원(floodplain)의 경우 때때로 범람에 의한 식생 고사가 발생함에도 불구하고 관목 확장이 가장 강하게 발생하였다고 분석되었다 (160%, Tape et al., 2006).

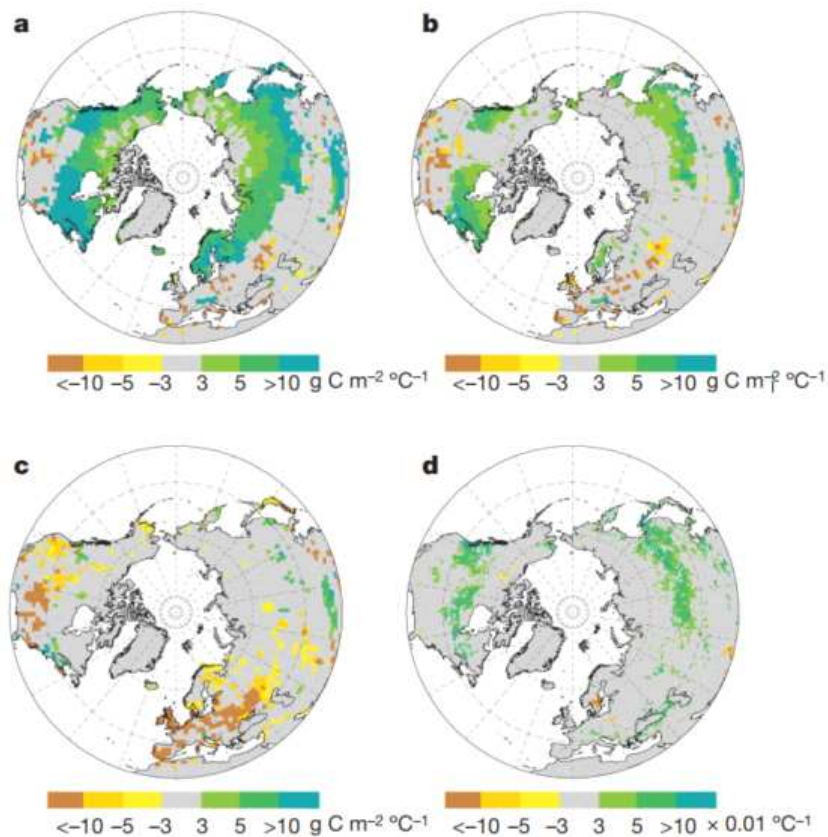
관목 확장은 단순한 식생 서식 면적의 증가가 아닌, 매우 복잡한 관련 생지화학 순환의 변화를 발생시키고, 이 변화들의 피드백 메커니즘에 의해 다시 영향을 받는다(그림10, Myers-Smith et al., 2011). 관목의 피복 및 밀도의 증가에 의한 엽면적의 증가는 지표면의 전체적 반사율(albedo)을 감소시켜 기온의 상승효과를 불러일으킬 뿐 아니라, 여름에는 그늘을 형성해 토양온도를 낮추고(Summer cooling), 겨울에는 반대로 단열효과를 일으켜 토양온도를 높이는(Winter warming) 등 계절적인 영향이 다를 수 있다, 또한 관목이 적설량보다 높이 자란 지역의 경우 해빙 속도가 빨라지고, 따라서 지표면 반사율(albedo)의 계절적 패턴을 변화시킨다. 또한, 관목은 툰드라(즉 초목)에 비해 탄소 저장량이 많고, 난분해성 낙엽을 생산하여, 성장한 관목(tall shrub)이 성장하는 지역일수록 토양분해속도가 더 빠르고 질소 순환의 속도가 더 빠른 것으로 분석된 바 있다(Myers-Smith et al., 2011).



<그림10> 관목 확장 과정 및 피드백 (Myers-Smith et al., 2011, 재작성)

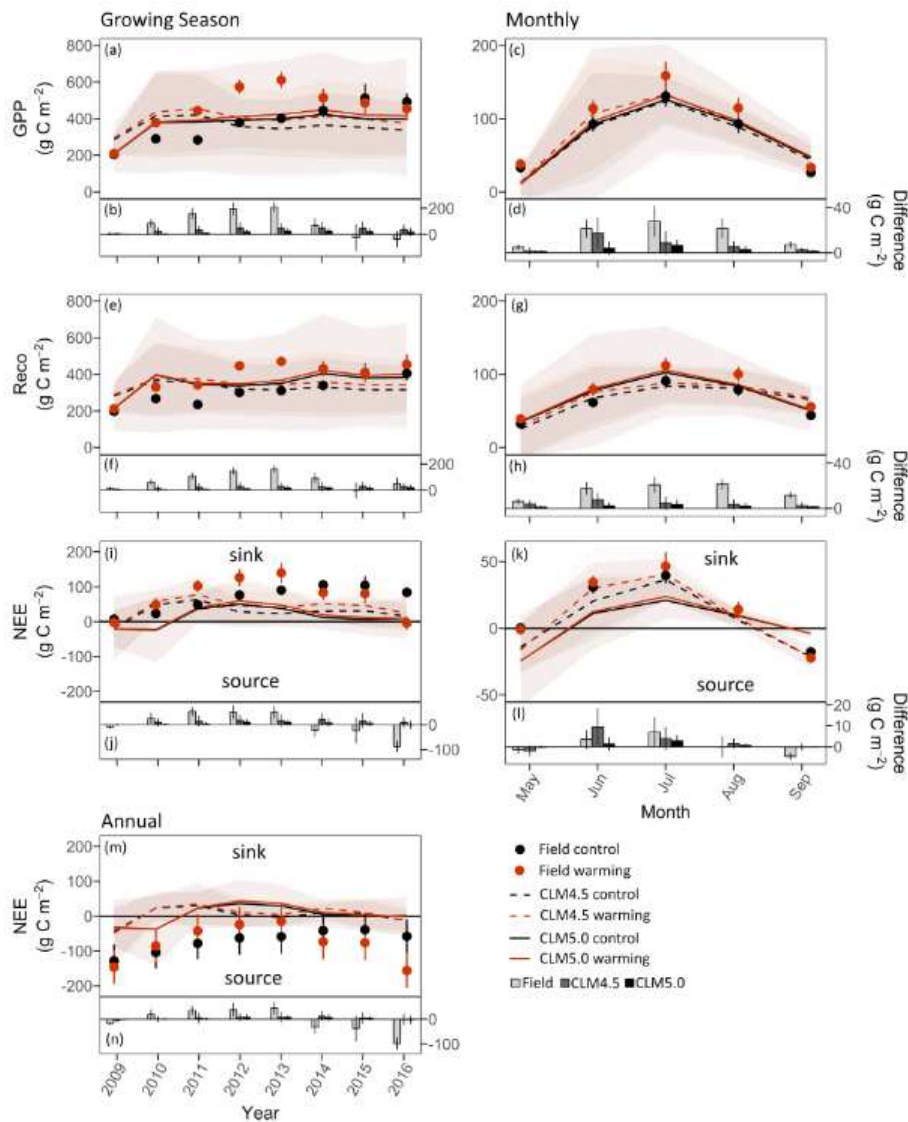
2. 연구 범위

관목 확장에 의해 발생하는 복잡한 피드백 메커니즘에 의해 변화하는 극지방 생태계 및 생지화학 과정에 관한 연구는 다양하게 진행 중이나 대부분의 연구는 현장 관측 및 원격탐사자료 분석에 중점이 맞춰져 왔고, 이의 과정기반 모형 구현은 상대적으로 미흡한 상황이었다. 하지만 최근 들어, 전지구 모형기반 생태모형을 활용하여 기온상승과 관목 확장의 피드백 메커니즘을 이해하려는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다. Piao et al. (2008)은 ORCHIDEE 모형을 사용하여 지난 20년간 총일차생산량(GPP), 순일차생산량(NPP), 순생태계생산량(NEP) 등의 결과를 분석하여 가을 온도 상승($0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)에 의해 증가한 호흡량(respiration)에 의해 극지방 가을 동안의 탄소 손실(carbon loss)이 발생했다고 보고하였다(그림11).



<그림11> ORCHIDEE 모형으로 모의한 지난 20년간 가을철 온도변화에 따른 (a)GPP 변화량, (b)NPP변화량, (c)NEP변화량, (d)원격탐사영상 정규식생지수(NDVI) 변화량(Piao et al., 2008)

하지만, 이러한 전지구 모형기반 생태모형은 대체로 big-leaf 기반(한 그리드에 한 식생종만 모의 가능) 지면-생태과정 모형으로써 모의 방법이 매우 단순하기 때문에 관측되고 있는 복잡한 Arctic 식생 성장 과정을 모사하는데 한계가 있다. Schadel et al. (2018)은 8년간의 토양 warming 실험 측정자료와 Community Land Model (CLM) 모의결과를 비교하여(그림12), 자료에서는 토양수분이 증가하고 총일차생산량의 증가로 인한 탄소 흡수량 증가(carbon sink)가 측정되었지만, 모형에서는 토양수분이 감소하고, 총일차생산량과 생태계호흡량의 선형적 증가에 의해 그러한 패턴이 모의되지 않았다.



<그림12> 8년간 토양 warming 실험과 CLM 모형 모의 결과 (Schadel et al., 2018)

이러한 측정 자료와 전지구 모형기반 생태모형 모의 결과의 차이는 온난화에 따른 극지적 수문-지형 조건의 변화에 따른 식생 반응을 모의할 수 있는 모형 구조의 결여 때문일 것이라 추정되고 있다. 국부적인 수문-지형 조건 변화에 의한 영향을 연구하기 위해서는 분포형 수문 생태 모형 (spatially-distributed ecohydrological model)을 활용할 수 있으나 이러한 유역기반 (catchment-based) 접근의 모형은 기후와 식생의 상호작용을 고려할 수 없는 한계가 있다. 따라서, 국부적 수문-지형조건의 변화를 반영할 수 있는 스케일의 지면-생태 모형으로 관목 확장 과정을 모사하는 모형의 구축 및 모의 수치실험이 필요하다.

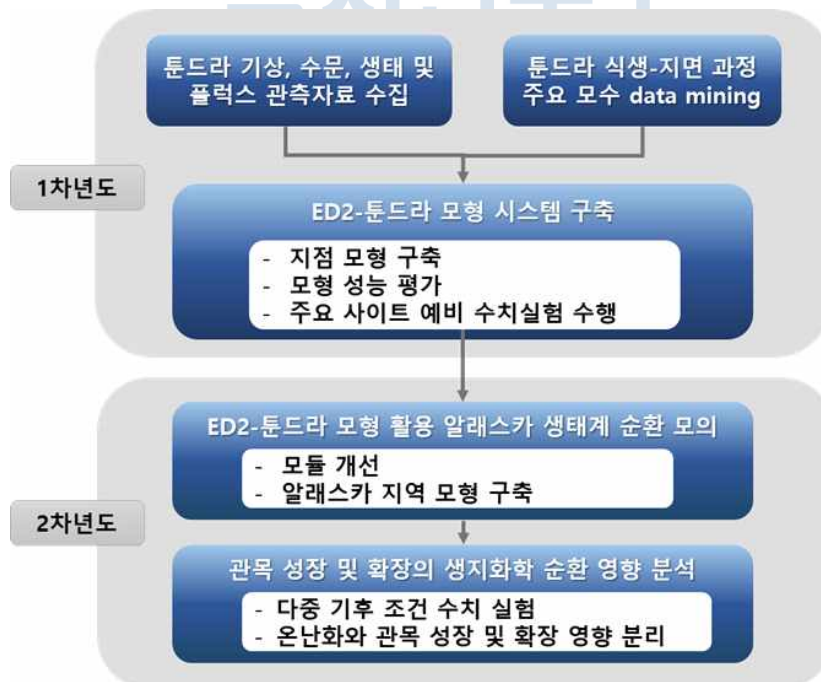
본 연구에서는 개별기반 지역생태모형인 Ecosystem Demography model version 2 (ED2)을 구축하고, 이를 기반으로 최근 관측되고 있는 극지방 관목 성장 및 확장 과정을 이해하고 이의 생태계 및 물순환, 탄소순환 영향 및 관련 피드백 과정을 모형 모의 결과를 바탕으로 고찰하도록 한다.



제 3 절 연구 계획

툰드라 지역내 수문(hydrography), 지형(topography), 생태(ecology) 관련 자료 및 플럭스 관측 자료를 수집하고 분석한다(그림13). 이후, 선행 연구들을 바탕으로, 식생 및 지면 관련과정의 주요 모수의 관측 범위에 대한 자료를 확보하고 분석한다. 주요 사이트 관측 자료를 활용하여 예비 수치실험을 수행하여 모형 모수를 최적화하고 모형의 불확실성을 정량화하는 모형의 성능 평가를 수행하도록 한다. 이후, 성능 평가 결과에 따라 관련 모듈 개선을 수행하여 ED2-툰드라 모형을 구축하도록 한다.

ED2-툰드라 모형의 알래스카 지역 구축에 요구되는 자료를 수집한다(그림 13). 다중 기후 조건(고정 및 관측 대기 온도)하에 ED2-툰드라 모형으로 수십 년 규모 수치실험을 수행하도록 한다. 관목 성장 및 확장 과정에서 전지구적 온난화와 지역규모 교란의 상대적 역할 및 피드백에 대한 고찰을 하도록 한다. 이와 더불어, 관목 성장 및 확장으로 인한 생지화학 순환의 계절적 변이를 고찰한다.

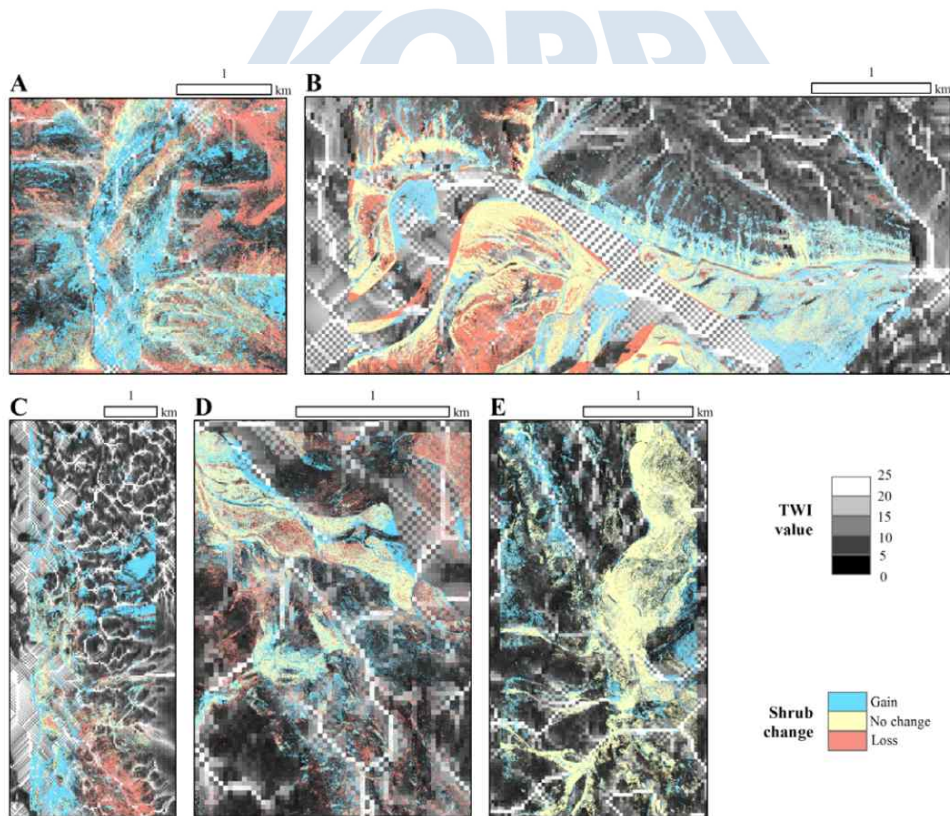


<그림13> 연차별 연구계획 도식도

제 2 장 국내외 연구 현황

제 1 절 국·내외 연구 현황

수문-지형 조건이 관목 지역 확장에 영향을 미치는 과정에 대한 논의는 주로 관측 자료를 기반으로 하여 활발하게 이루어지고 있다. Naito and Cairns(2011)은 북부 알래스카의 언덕에서 1970년대와 2000년대 사이의 관목이 지형습윤지수(Topographic Wetness Index, TWI)가 높은 지역으로 확장되었다는 것을 보였다(그림14). 또한 범람원에서의 관목 성장이 강기슭(river bank)와의 거리 및 지형 습윤지수(TWI)와 큰 상관관계가 있다는 것을 보였다(표1).



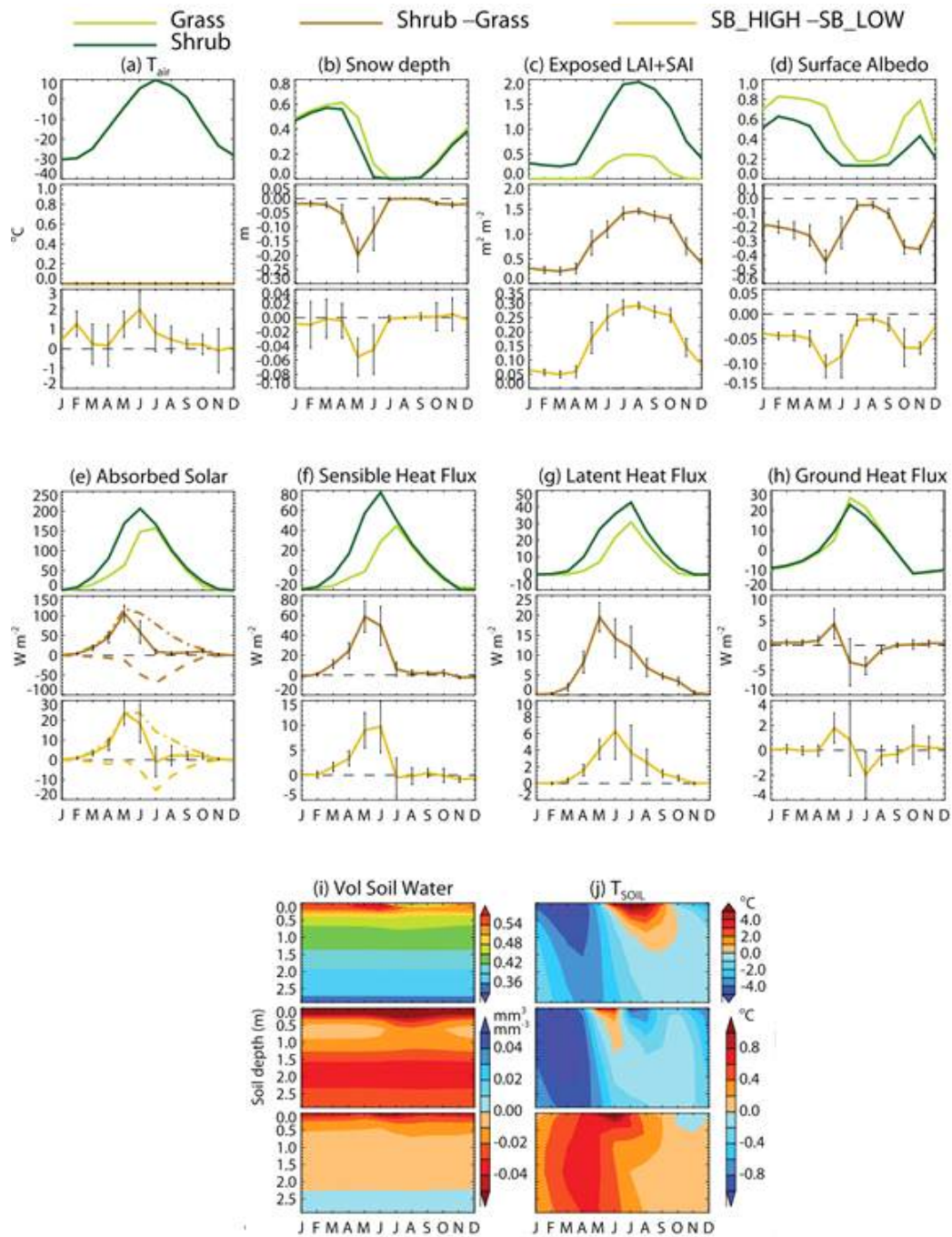
<그림14> 북부 알래스카의 지형습윤지수(TWI)와 1970-2000년 관목 확장 유무(Naito and Carins, 2011)

<표1> 관목 성장과 요인들간의 회귀분석(logistic regression) 결과(Naito and Carins, 2011)

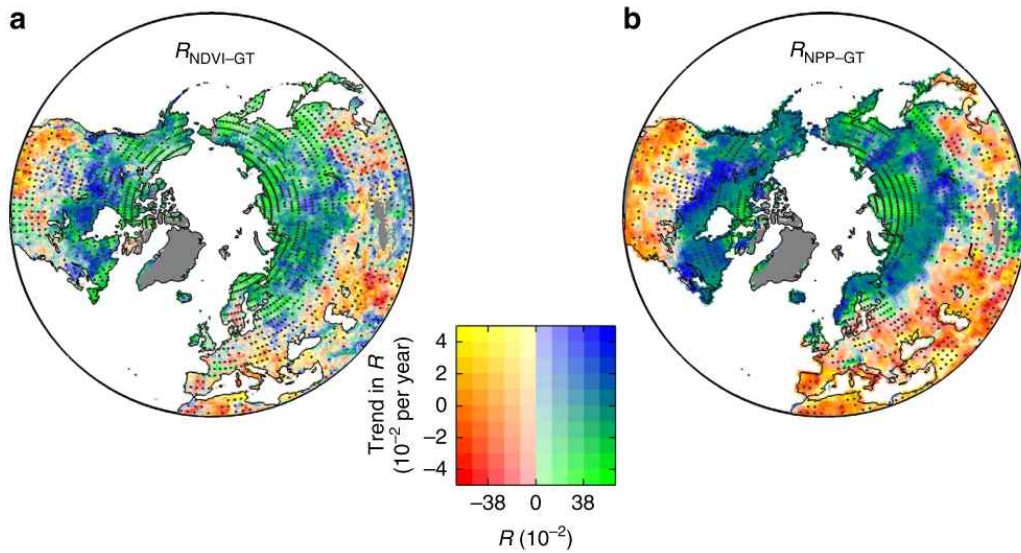
Variable	Coefficients				Analysis of deviance			
	Value	SE	t-value	df	Deviance	Residual df	Residual deviance	p
DIFF. DIST	0.0015	0.0004	3.1813	1	14.6035	1044	1425.49	0.0001
TWI	0.0715	0.0288	2.4938	1	7.6162	1043	1417.88	0.0058
WIDTH. 1970	0.0009	0.0018	0.4951	1	1.6617	1042	1416.22	0.1974
DIFF. WID	-0.0001	0.0021	-0.0659	1	0.0043	1041	1416.21	0.9474

온난화가 가속화되고 그에 의해 관목 지역이 확장되고 있음은 명백하고, 이에 의한 영향 분석을 위해서는 과정기반 모형을 활용해 세부 과정에 대한 체계적 이해가 필요하다. 하지만, 기존의 지역 및 전지구 기후모형 내의 지면 및 식생 과정 모사의 한계로 모형을 활용한 이해는 아직 제한적이다. Lawrence and Swenson(2011)은 Community Land Model(CLM4)와 Community Atmospheric Model(CAM4)을 접목하여 관목의 Shading으로 인한 Summer cooling 효과 및 Winter warming 효과와 그로 인한 동토층(permafrost) 깊이 변화를 분석하였다(그림15). 관목 지역이 초목(grass) 지역에 비해 봄철 해빙 속도가 빠르고, 적설위로 드러난 관목 면적으로 인한 표면 반사율이 낮고 따라서 흡수된 태양에너지가 증가하였다. 이로 인해 관목 지역에서 더 높은 토양온도와 더 얇은 활동층(Active Thickness Layer, ATL)이 모의되었고, 잠열과 현열 플럭스는 높게 모의되었다고 보고하였다. 하지만, 이 연구는 관목지역을 경계조건으로 활용하였기 때문에(즉, prescribed vegetation composition) 관목 성장 및 확장 과정에 대한 고찰은 미흡하였다.

Piao et al. (2014)은 1980년 초반부터 2011년까지 북반구 순일차생산량(NPP)의 연간변동과 성장기간(growing season) 온도의 연간 변동의 상관 관계가 점점 약해지고 있다는 연구 결과를 바탕으로 기후변화에 대한 북반구 식생의 민감도가 달라지고 있다고 보고하였다(그림16). 하지만 해당 연구에 사용된 열 종류의 과정기반 모델들(HyLand, Lund-Potsdam-Jena DGVM, ORCHIDEE, Sheffield



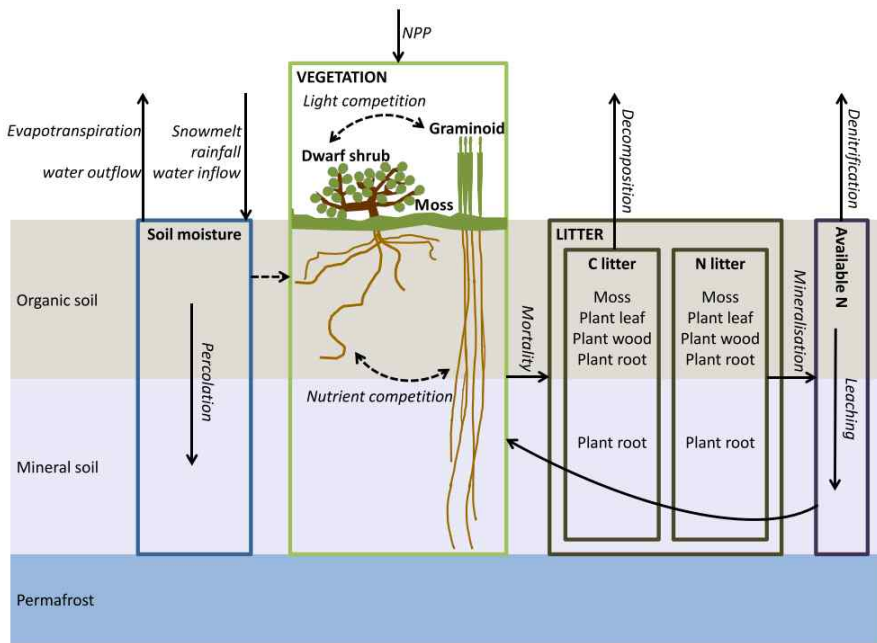
<그림15> Community Land Model(CLM4)와 Community Atmospheric Model(CAM4)을 접목시켜 초목(grass)와 관목(shrub) 서식시 에너지 플럭스와 토양 수분 및 온도 모의 결과(Lawrence and Swenson, 2011)



<그림16> 30년간(1980-2011년) 성장기간(growing season) 정규식생지수(NDVI)와 평균온도의 상관관계(R)의 변화와 순일차생산량(NPP)와 평균온도의 상관관계(R)의 변화(Piao et al., 2014)

-DGVM, JULES, LPJ_GUESS, CLM4C, CLM4CN, OCN 및 VEGAS)은 모두 정적 사전 식생 조건(static prescribed vegetation composition)을 바탕으로 생태계 순환을 모의함으로써, 30년간의 식생 분포 변화(즉 관목 확장)에 의한 순일차생산량 증가를 고려하지 못함으로써 식생의 기후민감도 저하가 고평가(overestimation)되었을 가능성이 있다.

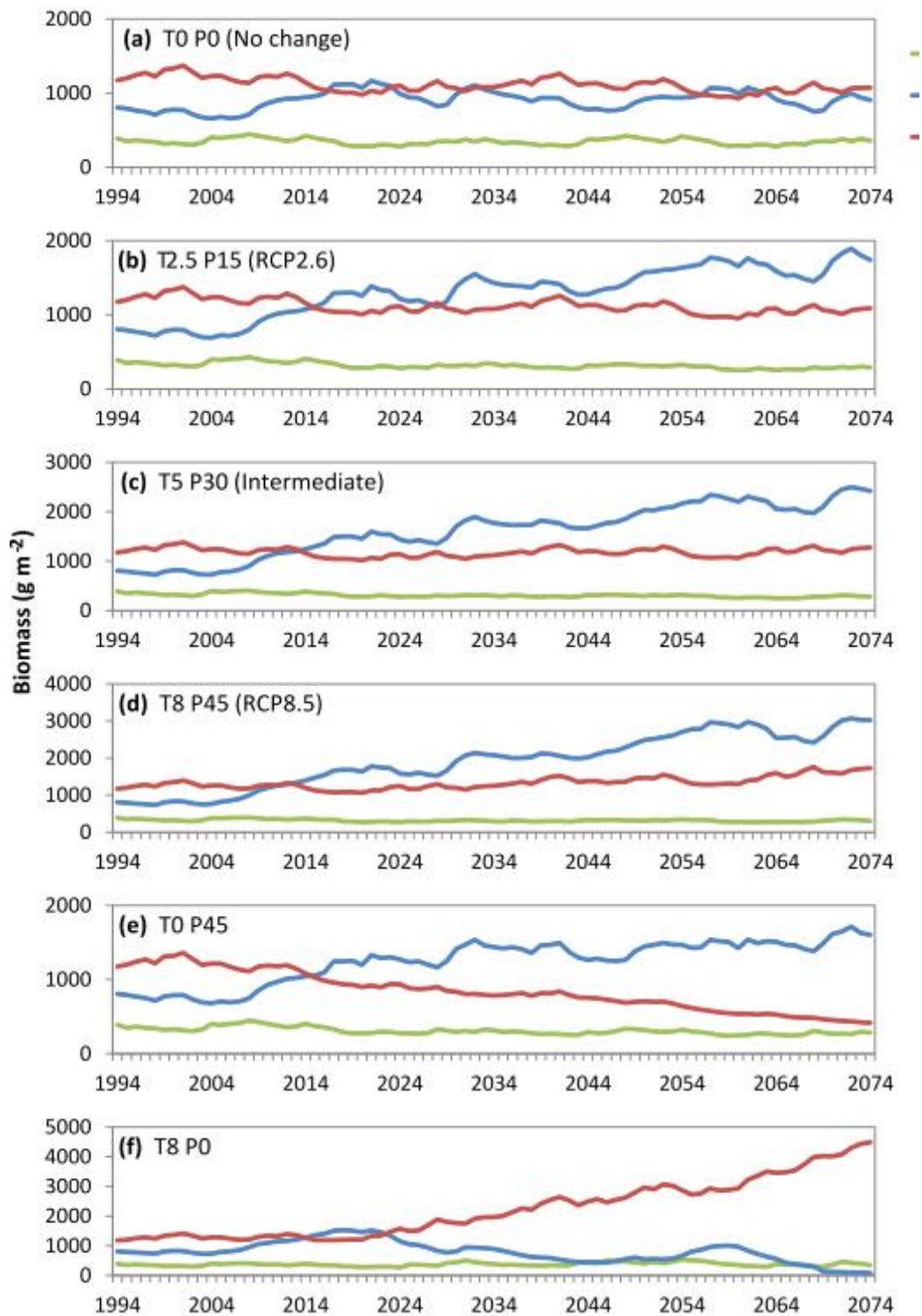
국지적 수문-지형 조건의 변화에 따른 식생 반응을 모의할 수 있는 모형을 적용한 연구는 아직 미흡하다. van der Kolk et al. (2016)은 NUCOM-tundra(NUtrient and COMpetition) 모형(그림17)을 적용하여 5가지 식생-지면 조건(relatively well-drained shrub to water-logged graminoid-dominated wetland)에서 16가지의 기후변화 시나리오(온도와 강수량 변화의 조합)에 따른 식생 구성 변화와 동토층 변화를 모의하는 수치실험을 수행하였다. 모의 실험 결과, 온난화만 발생시에는 관목이 확장되고, 강수량이 증가할 때는 초목이 확장된다고 보고하였다(그림18). 온난화가스 농도경로 시나리오(RCP)대로 온난화와 강수량 증가가 동시에 발생할 경우 늪지(wetland)형성과 영양분(nutrient)의 부



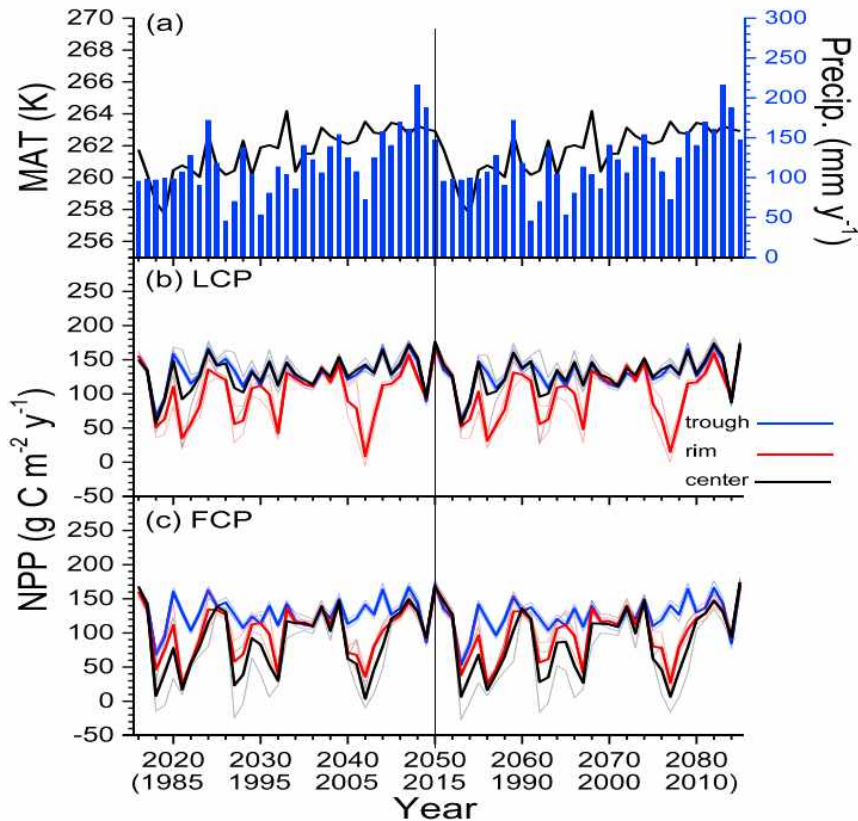
<그림17> NUCOM-tundra 모형 도식도
(van der Kolk et al., 2016)

죽으로 인해 초목의 확장이 지배적일 것이라는 모의 결과를 발표하였다.

Grant et al. (2019)은 RCP8.5 기후변화 시나리오에 지표면을 각개의 폴리곤 (polygon)으로 구분하고 연결짓는 ecosys 모형을 적용하였다. 연구지인 Barrow 사이트 지표면의 47%은 flat-centered polygon(넓이와 길이가 6 m인 중앙과 그를 둘러싼 1 m 넓이의 둘레)로 구분되었고, 그 외 지역은 low-centered polygon(중앙이 둘레보다 0.2 m가 낮음)로 구분되었다. 2014-2015년을 기준 점으로 했을 때, 기온상승과 대기중이산화탄소 농도 증가, 강수량 증가로 인해 2015-2085년의 순일차생산량(NPP)이 약 $50-150 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 증가할 것이라고 분석하였다(그림19). 또한, 미생물 호흡(heterotrophic respiration)의 증가량이 상대적으로 적어서 순이산화탄소 흡수량(net CO₂ uptake)은 늘어나지만 메탄(CH₄)의 증가량으로 인해 온실가스 감소 효과는 없을 것으로 추측하였다. 하지만 기후변화에 의한 수문조건 변화는 동시에 모의하지 않고 고정하였기(fixed) 때문에, 기후변화에 따른 배수 지역이 확대될 경우 순이산화탄소 흡수량의 증가와 메탄의 증가는 감소할 가능성을 남겨두었다.



<그림18> 기후변화 시나리오별 식생별 바이오매스 변화 모의 결과
(van der Kolk et al., 2016)



<그림19> ecosys 모형으로 모의한 RCP8.5 기후 시나리오에 따른 알래스카 북부 Barrow 사이트에서의 CO2 플럭스 변화 (Grant et al., 2019)

우리나라에서 극지를 대상으로 지역 생태계 모형을 활용한 연구는 시작단계로서 극지방 관목 성장 및 확장 과정에 대한 연구는 전무하고, 전지구기반(global) 기후-지면-생태계 모형을 활용한 기후-탄소 상호작용 측면의 연구가 대다수이다. 전세계적으로도 모형을 활용한 관목 성장 및 확장 과정 및 영향에 대한 연구는 최근에 주요한 극지 관련 이슈로서 떠올랐고, 관련 연구가 시작단계에 있다. 본 연구에서 활용될 Ecosystem Demography model version 2(ED2) 모형은 지역 개별기반(Individual-based) 지면-생태 모형으로써, 식생의 크기 및 나이(Size & Age) 그룹을 기반으로 생태계 인구통계 및 관련 물, 에너지, 탄소 수지를 모의하는 최신의 지역-생태모형이다. 기 구축된 ED2 모형을 바탕으로, 극지 생태-기후 상호 작

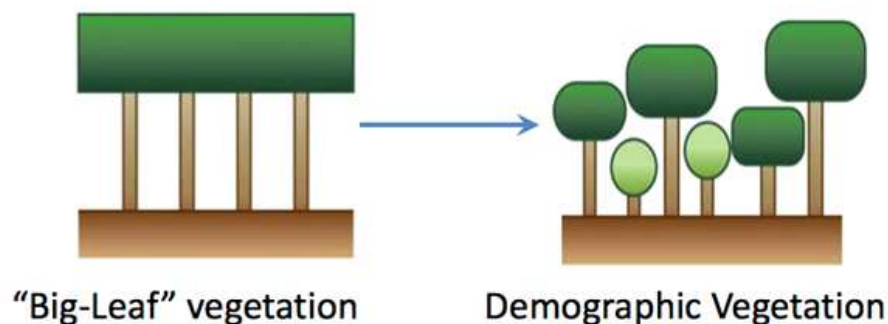
용에 대한 연구 및 관측 자료를 바탕으로 이산화탄소 및 메탄 배출 모형의 개선 등을 통해 향후 극지 생태계 연구를 위한 모형 플랫폼을 제공할 수 있다고 사료된다. 또한 본 연구의 결과는 관측-모형 연구 상호 보완을 위한 모형 플랫폼을 제공할 것으로 기대된다. 구축된 모형을 활용하여 기후변화 민감지역 도출등을 통해, 향후 관측 지역 선정, 관측 실험 디자인 등에 활용될 수 있다. 따라서 본 연구는 개별기반 생태모형을 구축하고 활용하는 선제적 연구로, 우리나라 극지방 지면생태 모델링 기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.



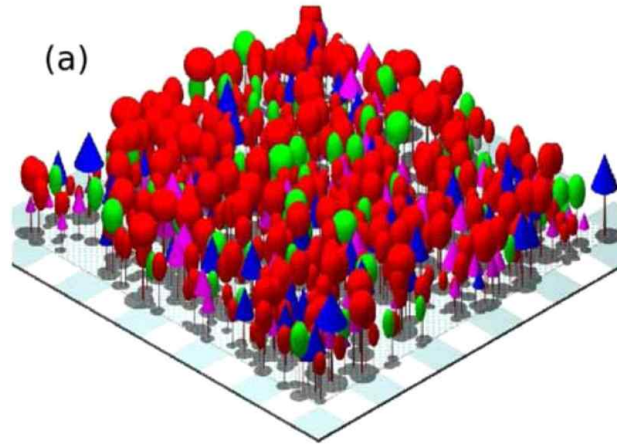
제 2 절 개별기반 지역생태모형(ED2)

1. ED2 모형 구조

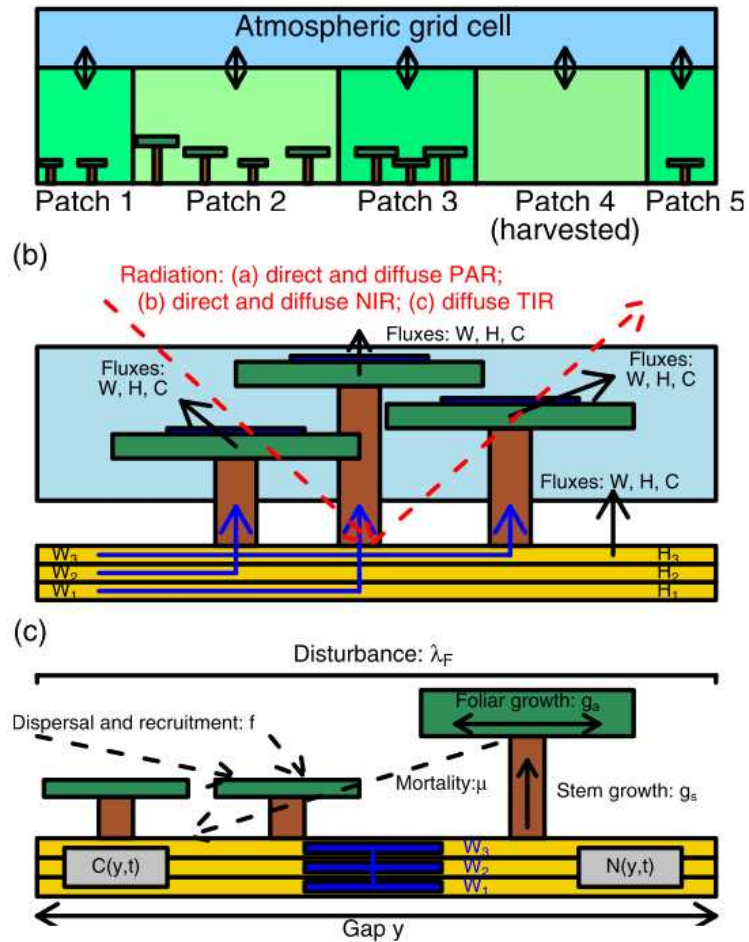
본 연구에서 사용된 ED2 모형(Ecosystem Demography model version 2, Medvigy et al., 2009)은 수문(hydrology), 지표면 생태계 프로세스(land surface ecosystem processes), 토양 생지화학 순환(soil biogeochemical cycle)을 모의하는 개별기반 지역생태모형(Individual-based regional ecosystem model)이다. ED2는 현재 전지구시스템 모형에 접합되어 있는 Big-leaf 기반지면-생태 모형의 차세대 모형으로써, 식생의 Size와 Age까지 고려하는 방법론을 적용했고(그림20, 21), 이를 NCAR CISM, NASA ModelE, DOE ALM 등에 적용한 모형이 개발 중이다. 동일한 기후조건(meteorological forcing)의 grid-cell 안에서 토양 및 지표 형질과 disturbance(예를 들어, 화재나 forest harvesting, 조림 등)가 동일한 지역별로 patch-cell을 나누고, 각 patch-cell 안에서 식생 타입별(plant function type)로 크기와 나이에 따라 그룹을 나누어(size and age-based grouping), 그룹별로 성장을 모의하고 이와 관련된 물, 탄소 및 에너지 플럭스 프로세스를 모의한다(그림22). 이 과정에서 추산되는 주요 변수들은 엽면적지수(LAI), 흉고단면적(Basal area), 총일차생산량(GPP), 순일차생산량(NPP), 증산 및 발산(evaporation and transpiration) 등이다(표2).



<그림20> Big-leaf 모형과 ED2 모형의 차이 도식도
(Koven et al., 2017)



<그림21> ED2 그리드내 타일(tile)별 식생 Age와 Size grouping 예시(Medvigy et al., 2009)



<그림22> ED2 모형 구조와 프로세스(Medvigy et al., 2009)

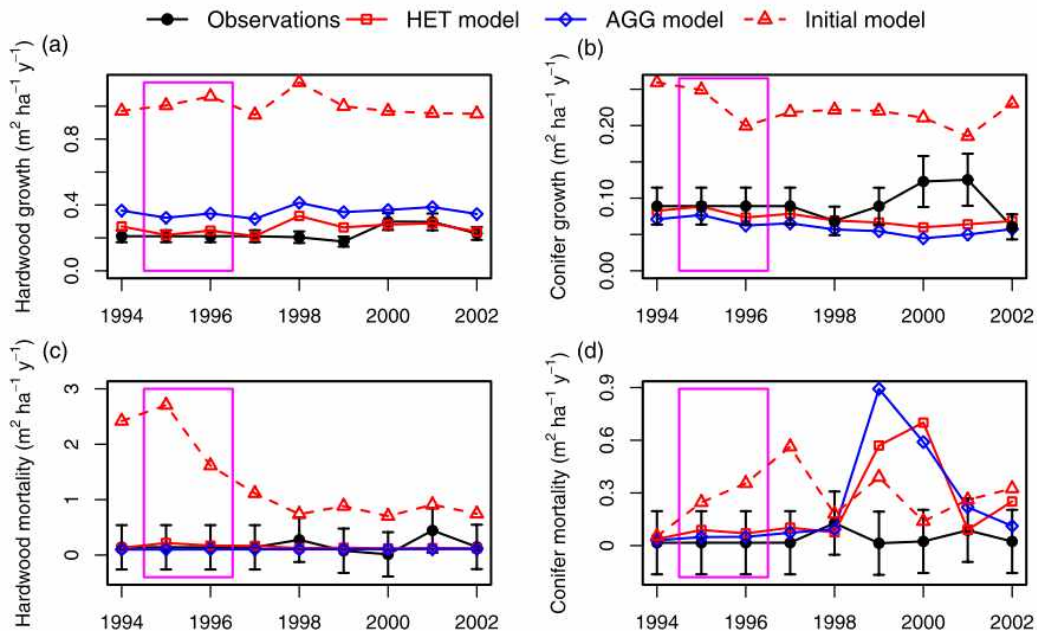
<표2> ED2 모형 추산 주요 변수

변수 이름	단 위
Basal area	cm ² /m ²
Leaf Area Index (LAI)	m ² /m
Diameter at breast height (DBH)	cm
Plant density	plant/m ²
Biomass (bark, leaf, fine-root, root, aboveground-sapwood, aboveground)	kgC/m ²
Patch age	yr
Coarse woody debris (carbon and nitrogen)	kgC/m ² , kgN/m ²
Soil Carbon (Fast, slow, structural pool)	kgC/m ²
Soil Nitrogen (Fast, slow, mineralized pool)	kgN/m ²
Assimilation rate (CO ₂ -limited, light-limited, RuBP-limited, Actual)	umol/m ² /s
Net stress factor (Moisture, Nitrogen)	--
Stomatal conductance	kg/m ² leaf/s
Gross Primary Productivity (GPP)	kgC/m ² /yr
Respiration (bark growth, leaf growth, leaf, root plant, heterotrophic, root growth)	kgC/m ² /yr
Net Ecosystem Productivity (NEP)	kg/m ² /yr
Net Primary Productivity (NPP)	kgC/m ² /yr
Leaf transpiration	kg/m ² /s
Evaporation (leaf, wood)	kg/m ² /s
Interception (Leaf, Wood)	kg/m ² /s
Throughfall rate	kg/m ² /s
Surface runoff	W/m ²
Sensible heat	W/m ²
Soil heat flux	W/m ²
Soil water flux	kg/m ² /s
Soil temperature	K
Soil water content	m ³ /m ³

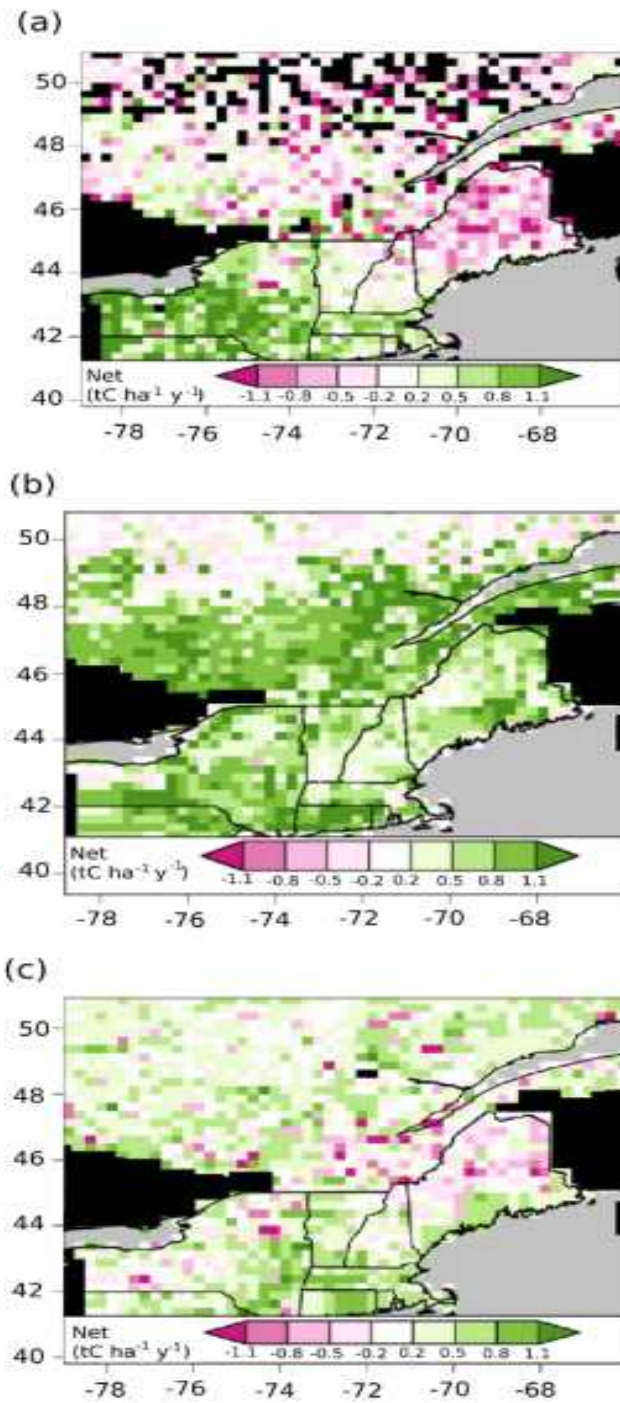
2. ED2 모형 적용 선행 연구

ED2는 현재까지 북미 북동부지역의 온대기후 혼효림, 아마존의 열대림 및 알래스카 한대림 등 다양한 종류의 생태계의 생지화학 순환(biogeochemical cycle) 및 에너지 순환(잠열 및 현열, latent heat and sensible heat cycle)의 연구에 사용되었다. Medvigy et al. (2009)는 ED2 모형의 모수를 2가지 방법으로 최적화하여(HET-개별 측정치로 각 타일을 초기화; AGG-측정치의 평균값으로 전체 타일을 초기화, 즉 big-leaf 구조), 개별 측정치로 타일별 식생의 모수를 최적화시켰을때의 온대기후 혼효림(미국 북동부 Harvard Forest와 Howland Forest)의 성장 및 플릭스 결과가 측정자료와 더 근접하고, 따라서 식생의 불균질성(heterogeneity)을 반영할 수 있는 개별구조 기반 모형 구조가 중요함을 보였다(그림23).

이러한 개별구조 기반 모형의 특성은 지역 스케일의 연간 모의 결과에서 더욱 확연히 드러난다(그림24). Big-leaf 기반 모형 구조와 같은 AGG 모형모수 최적화 방법은 미국 북동부 지역의 지상 biomass 연간 순축적량(Net aboveground



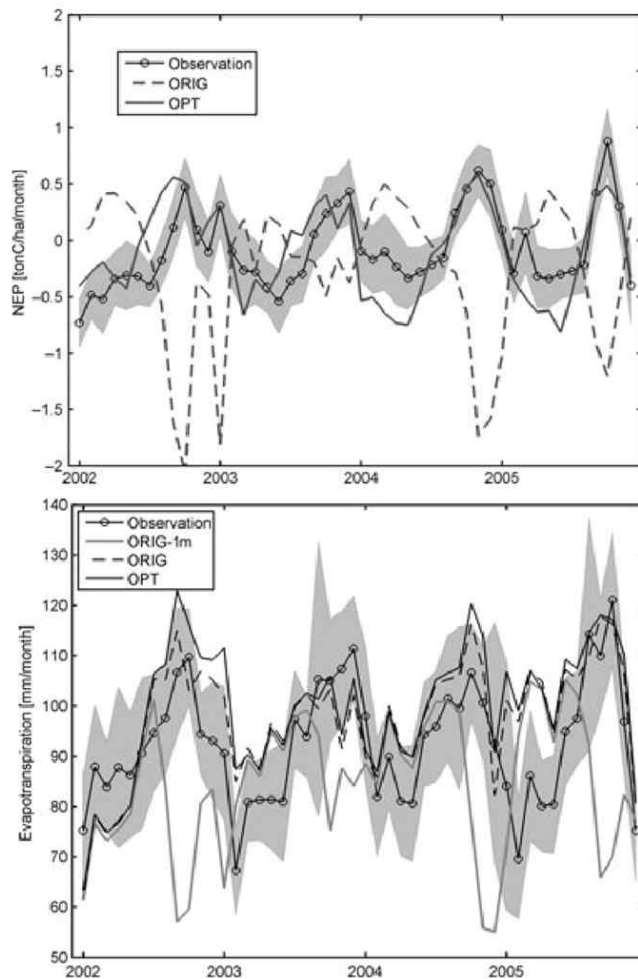
<그림23> 미국 북동부 Harvard Forest 식생 성장의 모수 최적화 결과 (Medigy et al., 2009)



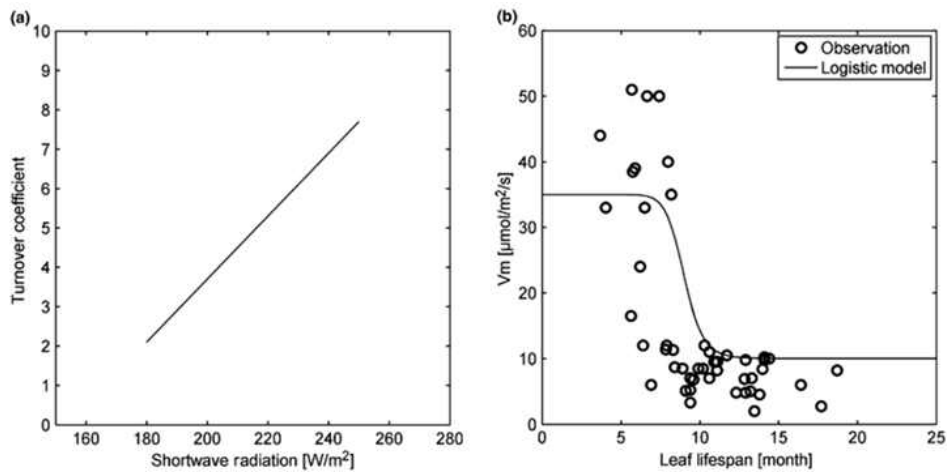
<그림24> 지상 biomass 연간 순축적량(Net aboveground carbon accumulation).
 (a) 관측값 (b) AGG 방법(식생 평균값)으로 ED2 모형 모수 최적화 결과
 (c) HET 방법(식생 개별값)으로 ED2 모형 모수 최적화 결과(Medvigy et al. 2009)

carbon accumulation)을 측정 자료와 비교시 전반적으로 높게 모의하였다. 또한, 자료상 순축적량이 감소하고 있는 지역의 대부분을 증가하고 있다고 모의하는 등, 그 방향성까지 반대로 추산하는 결과를 보였다. 반면, 개별 타일의 모수가 최적화된 HET 방법의 모의 결과는 강도와 방향성이 측정 자료와 거의 일치하는 결과를 보였다.

Kim et al. (2012)은 열대우림(브라질 Tapajos 국립공원) 플릭스 타워에서 측정한 순생태계생산량(Net Ecosystem Productivity)와 ED2 모형 모의 결과의 계



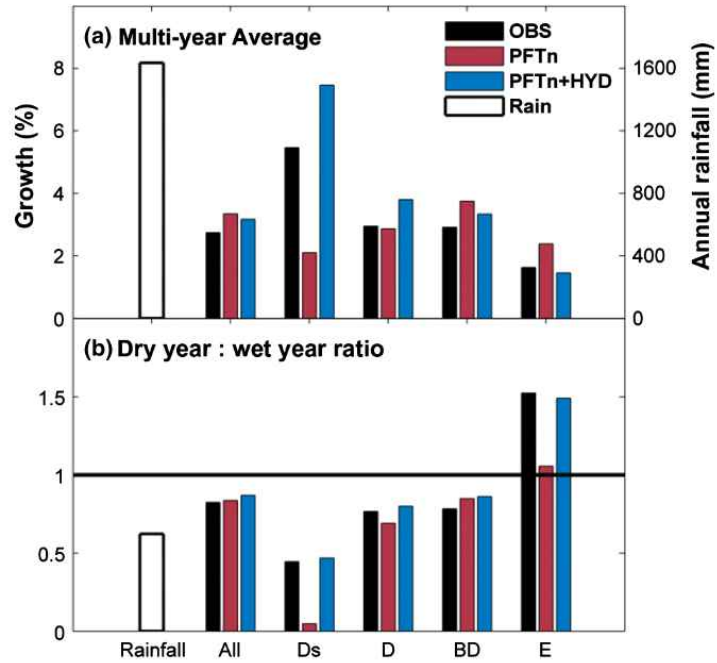
<그림25> ED2 생장계절 수정 전(ORIG) 후(OPT) 순생태계생산량(NPP) 및 증발산(Evapotranspiration, ET) 모의 결과 및 관측량(Kim et al., 2012)



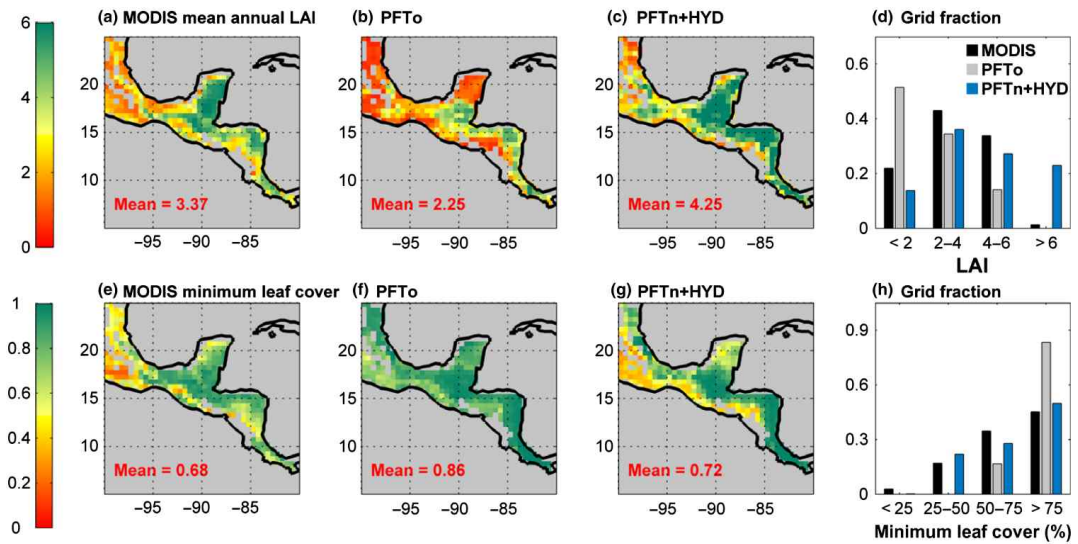
<그림26> 열대우림의 Light-controlled phenology와 엽면성장기간 변화에 따른 광합성능력(photosynthetic capacity) 변화량 (Kim et al., 2012)

절 패턴이 반대임을 발견하였다(그림25). 열대우림에서 건조한 기간(즉, 구름이 없고 일사량이 높은 기간)동안 옆면의 고사율이 높고 새로운 잎의 광합성 능력(photosynthetic capacity)이 크다는 관측결과를 바탕으로 열대우림의 light-controlled phenology 모듈을 개발하고 ED2 광합성 모듈을 엽면성장기간(leaf lifespan)의 함수로 수정하였다(그림26). 그 결과 측정된 순생태계생산량(NEP)과 ED2 모형 모의 결과가 더 일치함을 보였다(그림25). 이렇듯, ED2는 식생별로 생리적 특성(physiological characteristics)를 바꿀수 있고, 식생의 성장에 따른 생리적 변화를 모의할 수 있는 것이 다른 TEM(terrestrial ecology model)들과의 큰 차이이다.

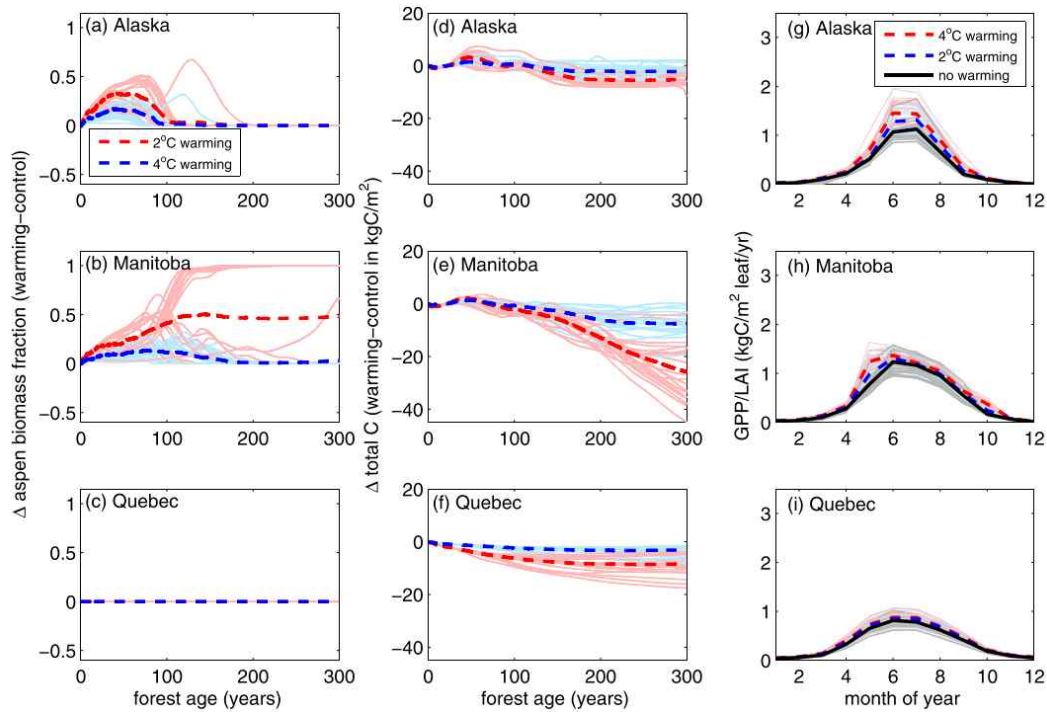
Xu et al. (2016)은 또한 식생별 기계적 식생 수력 모듈(plant hydraulic module)을 도입하여 토양수분이 감소하며 토양 포텐셜(soil potential)이 낮아지고 그로인한 토양-뿌리-잎-대기의 포텐셜 차이 변화에 의한 water flow의 차이를 구현하는 water stress scheme을 ED2에 결합시켰다. 모듈 모수를 네 가지 식생 타입별로 각각 최적한 결과, 코스타리카 열대우림의 지상 바이오매스 성장률(aboveground biomass growth)과 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 지상 측정치와 원격탐사추정치와 비슷하게 구현하는 것을 보였다(그림27, 28).



<그림27> 식생 타입별 (plant function type, PFT) 지상 바이오매스 성장률 (Aboveground bioass growth) 측정치와 모의 결과 (Xu et al., 2016)



<그림28> MODIS LAI 추정자료와 ED2 모형 LAI 모의 결과 (Xu et al., 2016)



<그림29> 한대림에서의 기온상승 시나리오별 Aspen biomass 변화량과 산림 총탄소량 변화 모의(Trugman et al. 2016)

극지연구소

뿐만 아니라, 화재의 발생과 그로 인한 생태계 피드백 매커니즘에 관한 연구에도 ED2 모형이 적용되었다. Trugman et al. (2016)은 알래스카 남부 및 중부 한대림 (boreal forest)에서의 화재후 토양 유기층 깊이의 변화(dynamic soil organic layer change)와 유기층 깊이에 따른 식생별 묘목 고사율(mortality)를 모의하는 모듈을 ED2 모형에 삽입하여, 중간 화재(mild fire) 발생시 토양 분해와 식생 생산량이 줄어들음을 보였다. 또한 기온이 4도 상승시 침엽수림(evergreen forest)에서 낙엽수림(deciduous forest)으로의 산림 식생 타입 전환에 의한 총 생태계 탄소 감소량 40%가 화재로 인해 감소할 것이라는 모의 결과를 발표하였다(그림29).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발 내용 및 방법

1. 주요 사이트 기상 자료 수집

툰드라 지역 ED2 체계 구축에 앞서, ED2 지점모형의 모의 및 검증에 위해 기상 관측 및 플럭스 자료가 수집되고 있는 세 사이트 (Atqasuk, Barrow, Council)의 기상 관측 자료와 장기 지상 기상 관측이 이루어지고 있는 Toolik 지역의 기상 관측 자료를 수집하였다(그림30, 31, 표3). ED2 모형 구동을 위해 필요한 기상 자료(표4)는 대기 온도(Kelvin), 강수량($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$), 일사량(장파 단파 각각, W/m^2), 지표면 대기압(Pa), 대상류 및 자오면류 풍속(m/s), 비습도(specific humidity, ratio)이고, 대기중 이산화탄소(ppm)의 입력은 선택 사항이다.



<그림30> 주요 사이트

US-Atq, US-Brw, Toolik station,
극지연구소



<그림31> 주요 사이트

(US-Brw, US-Atq, Toolik station, 극지연구소) 전경
(사진출처: AmeriFlux 데이터베이스, 극지연구소 박상중)

<표3> 주요 사이트 목록

사이트명	좌 표
US-Brw	71° 19'21.00"N, 156° 36'33.01"W
US-Atq	70° 28'10.56"N, 157° 24'32.04"W
Toolik station	68° 37'59.96"N, 149° 33'59.12"W
극지연구소	64° 50'38.40"N, 163° 42'39.60"W

<표4> ED2 모형 모의에 필요한 기상 자료 목록

종 류	단 위
Air temperature	Kelvin
Precipitation rate	kg H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Downward long wave radiation	W m ⁻²
Near infrared beam downward solar radiation	W m ⁻²
Near IR diffuse downward solar radiation	W m ⁻²
Visible beam downward solar radiation	W m ⁻²
Visible diffuse downward solar radiation	W m ⁻²
Atmospheric pressure	Pa
Specific humidity	kg H ₂ O kg Air ⁻¹
Zonal wind	m s ⁻¹
Meridional wind	m s ⁻¹
Geopotential height	m
Surface CO ₂ mixing ratio (optional)	μ mol CO ₂ mol Air ⁻¹

Atqasuk와 Barrow 사이트의 플럭스 타워(타워 ID: US-Atq, US-Brw)는 AmeriFlux Network에 소속된 타워이다. North American Carbon Program (NACP, 그림32)에서 각 타워에서 측정된 자료를 바탕으로 QA/QC(Quality Assessment and Quality Control) 작업과 gap-filled 프로세스를 마친 후 제공하는 30분 간격 기상 자료를 수집하였다. NACP가 제공하는 자료 (US-Atq: 1999-2006, US-Bar: 1998-2006) 후의 기상 및 플럭스 자료는 타워 책임 연구자들에게 요청하여 수집하였다(Dr. Donatella Zona - University of Sheffield; Dr. Walt Oechel - San Diego State University). Toolik 지역 기상자료는 University of Alaska at Fairbanks 에서 운영하는 Toolik Field Station에서 관측한 1988-2016년의 시간별 기상자료를 수집하였다(자료 디렉터리: <https://toolik.alaska.edu>).

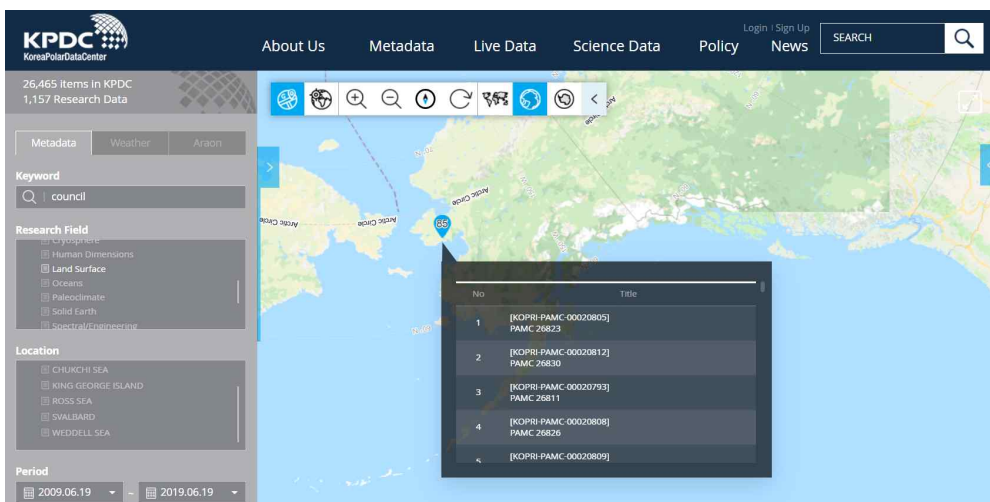
The screenshot shows the ORNL DAAC website interface. At the top, there are logos for EARTHDATA, ORNL DAAC, and NASA. A navigation menu includes 'About Us', 'Get Data', 'Submit Data', 'Tools', 'Resources', 'Help', and 'Sign in'. Below the menu is a search bar with the text 'Search ORNL DAAC' and a 'Search' button. The main content area displays the title 'NACP Site: Tower Meteorology, Flux Observations with Uncertainty, and Ancillary Data' and an 'Overview' section with a table of metadata.

DOI	https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1178
Project	NACP
Published	2013-08-09
Updated	2013-08-09
Usage	251 downloads
Citations	20 publications cited this dataset

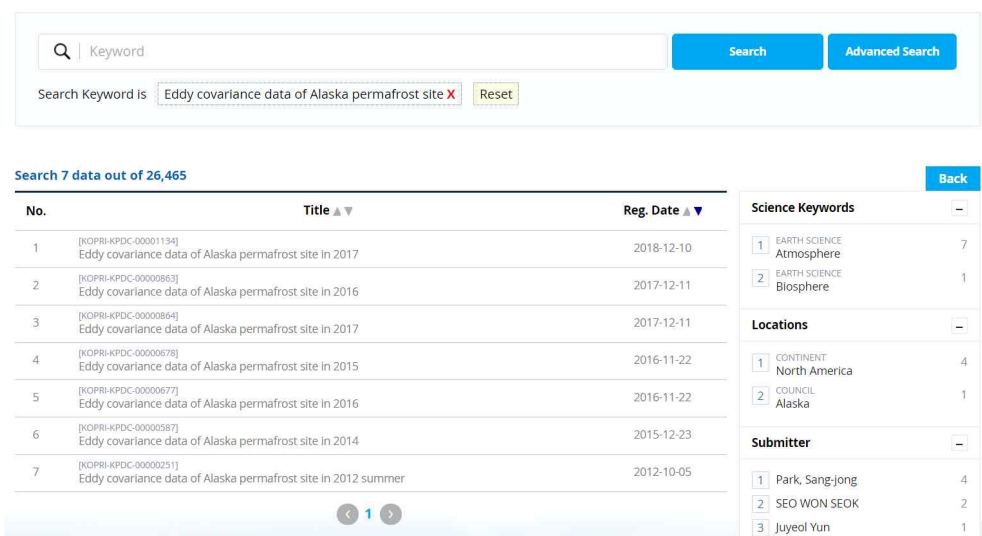
Below the table, there are buttons for 'Download Data 426.5 MB' and 'User Guide'. The 'Description' section states: 'This data set contains meteorological, carbon cycle flux, phenology, and ancillary data measured at 47 eddy covariance flux tower sites across North America. The data were used by North American Carbon Program (NACP) Site-Level Synthesis as model driver data and for assessing...'. To the right, there is a map of North America with a bounding rectangle and a 'Spatial Coverage' section showing the bounding rectangle coordinates: N: 71.32, S: 33.37, E: -68.74, W: -157.41. Below that, the 'Temporal Coverage' section shows the date range: 1991-01-01 to 2007-12-31.

<그림 32> US-Atq와 US-Brw 타워의 30분간격 갭필드(gap-filled) 기상자료를 제공하는 North American Carbon Program(NACP) 데이터베이스 (<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1178>)

Council 지역 기상자료는 극지연구소의 데이터베이스(KPDC, 그림33, 34)에 요청하여 3년(2012, 2014, 2015년)의 자료를 수집하였다. 기상자료 분석 기간(1979-2017년)동안 지상관측 자료가 이용 가능하지 않을 때의 기상 자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) North American Regional Reanalysis (NARR, 그림35)에서 제공하는 32km 3시간 간격 자료를 수집한 후, 선형보간법(linear-interpolation)으로 30분 간격 자료로 재구성하여 사용하였다.



<그림33> 극지연구소 데이터베이스(KPDC, <https://kpdc.kopri.re.kr/>)



<그림34> 알래스카에서 측정된 에디공분산 자료 목록

Home » Gridded Climate Data » NCEP NARR

NCEP North American Regional Reanalysis: NARR

See the [PSD NARR webpage](#) for more information on PSD's involvement in the NARR project

Brief Description:

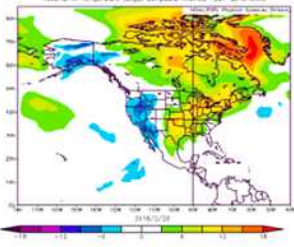
- NCEP's high resolution combined model and assimilated dataset. It covers 1979 to near present and is provided 8-times daily, daily and monthly on a Northern Hemisphere Lambert Conformal Conic grid for all variables. [More...](#)

Temporal Coverage:

- 8-times, Daily and Monthly means for 1979/01/01 to May 31, 2019 .
- Long Term Daily, Monthly means for years 1979 - 2000.

Spatial Coverage:

- The native model grid is converted to a Northern Lambert Conformal Conic grid which is what we archive. Corners of this grid are
 1.000001N, 145.5W; 0.897945N, 68.32005W; 46.3544N, 2.569891W; 46.63433N, 148.6418E
- The grid resolution is 349x277 which is approximately 0.3 degrees (32km) resolution at the lowest latitude. A [page describing the coverage](#) along with information on reading the projection is available.



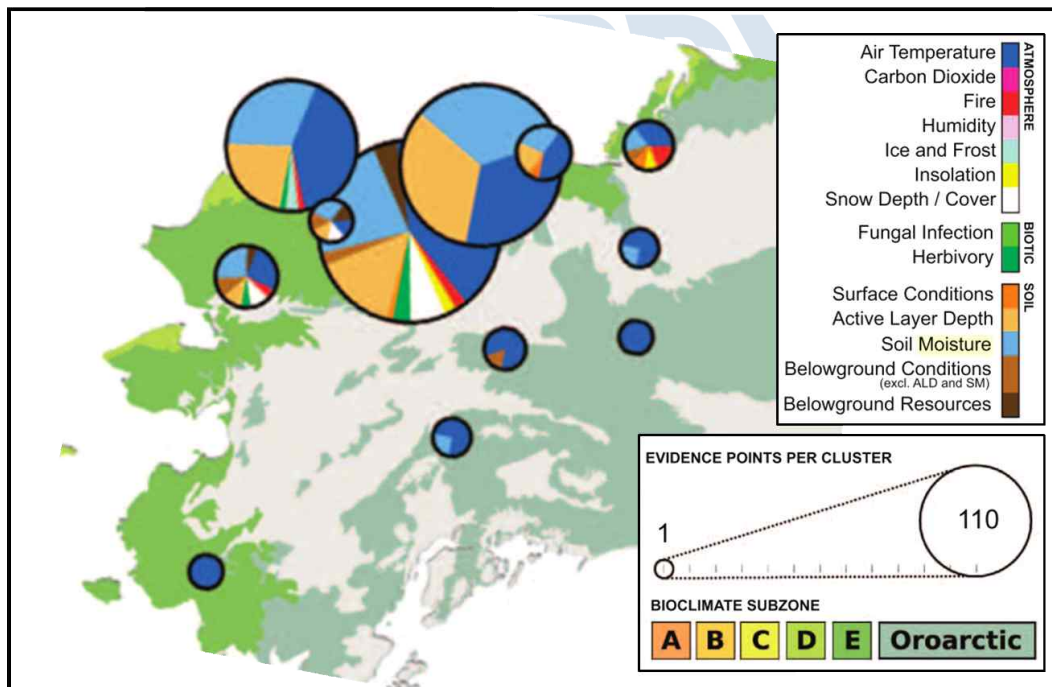
<그림35> 32km 공간분해능의 3시간 간격 기상자료를 제공하는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) North American Regional Reanalysis (NARR: <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/>)

<표5> 기상 자료 데이터베이스 목록

기상 자료	홈페이지
North American Carbon Program (NACP)	https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1178
Toolik Field Station (University of Alaska Fairbanks)	https://toolik.alaska.edu
Korea Polar Data Center (KPDC)	https://kpdc.kopri.re.kr/
National Centers for Environmental Prediction (NCEP) North American Regional Reanalysis (NARR)	ftp://ftp.cdc.noaa.gov/

2. 주요 사이트 기상자료 분석

ED2 모형을 모의하기 위해서 요구되는 필수 기상자료는 총 7가지로써, 대기 온도(Kelvin), 강수량($\text{kg H}_2\text{O/m}^2/\text{s}$), 일사량(장파장 단파장 각각, W/m^2), 지표면 대기압(Pa), 대상류 및 자오면류 풍속(m/s), 비습도(specific humidity, ratio)이다. 선행 연구들에 따르면, 이러한 기상 변수들 중 대기 온도와 토양수분이 알래스카 지역의 관목 성장 및 확장에 가장 많은 영향을 미친다고 추정된다(Martin et al. 2017, 그림36). 토양 수분은 강수량, 대기 온도, 순 복사량, 증발산량, 풍속 등의 기상 조건에 결정된다고 알려져있다(Barling et al. 1994). 따라서, ED2 모형에 주어지는 기상 자료들 중 대기 온도와 강수량이 가장 중요한 변수일 것이라 예상된다.

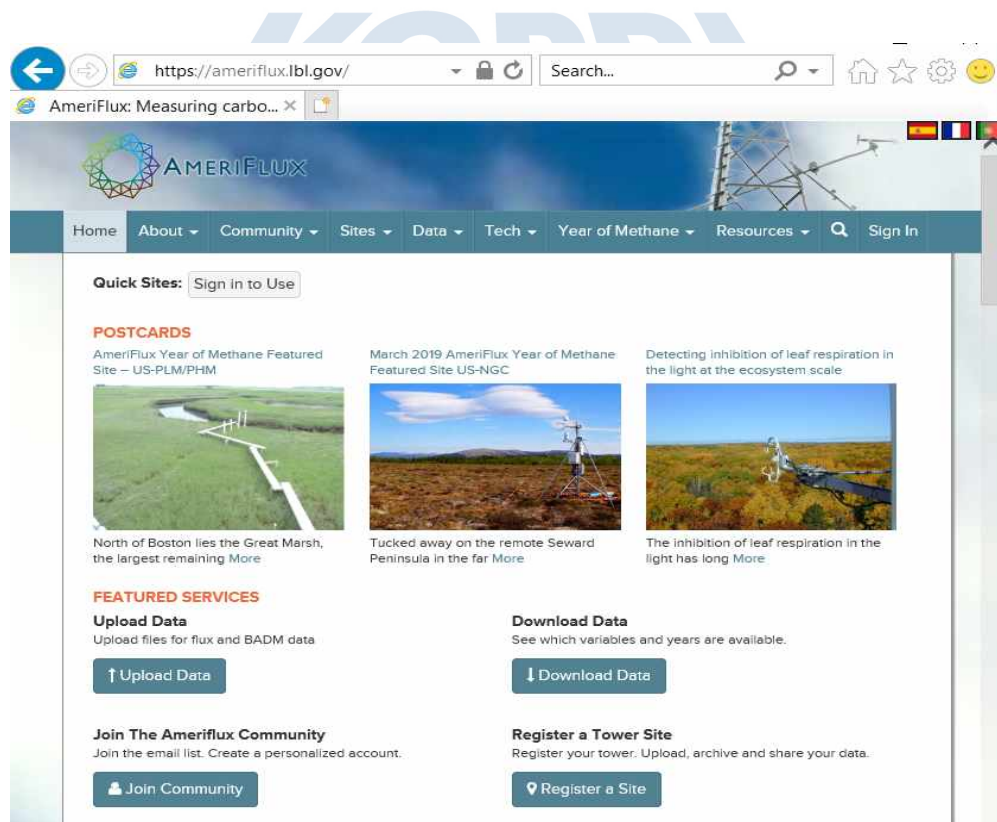


<그림36> 극지방 관목 성장 및 확장의 주요 기상요소 분석 결과
(Martin et al. 2017, 재작성)

3. 플럭스 자료 수집 및 프로세싱

US-Atq 타워의 자료는 FLUXNET2015에서, US-Brw 타워의 자료는 AmeriFlux 에서 각 6년, 10동안의 자료를 수집하였다 (그림37, 그림38). FLUXNET2015는 QA/QC-checked gap-filled 자료를 제공하는 한편, AmeriFlux는 level-0 (QA/QC 플래그가 없는 관측치)를 제공한다. 극지연구소 타워의 자료는 극지연구소 자료베이스(KPDC)에 요청하여 3년(2012, 2014, 2015년)의 level-0과 level-2 자료(QA/QC 플래그 제공)를 수집하였다(플럭스 타워 P.I.: 박상중 박사).

QA/QC(Quality Assessment and Quality Control) 플래그가 없는 US-Brw 타워의 플럭스 자료는 선행 연구들의 방법들을 바탕으로(표6), u^* (friction velocity)-threshold 방법과 moving-window 방법으로 1차 quality control을 하



<그림37> US-Brw 플럭스 자료를 제공하는 AmeriFlux 자료 베이스 (<http://ameriflux.lbl.gov/data/download-data>)

The screenshot shows the Fluxdata website's page for the FLUXNET2015 Dataset. The browser address bar shows the URL: https://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/. The website header features the Fluxdata logo and navigation links: Home, About, Community, Sites, Data, and Sign In. The main content area is titled 'FLUXNET2015 Dataset' and contains a detailed description of the dataset, a 'Download FLUXNET2015 Dataset' button, and a world map showing data collection sites. A sidebar on the right includes 'USEFUL LINKS' and 'FLUXNET 2015'.

<그림38> Atqasuk 플럭스자료를 제공하는 FLUXNET2015
(http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/)

<표6> 선행 플럭스 자료 quality control 방법

참고자료	타위명	방법
Zona et al. 2009. Gl.Biogeoc.Cy.	BES	$u^* > 0.25$ m/s, removed outliers ($>6\text{std}$) wind dir b/w 350-180
Engstrom et al. 2006. JGR-B Harazono et al. 2003. Tellus B	BRW	outliers (higher than $3 \times \text{mean}$ of 3 points)
Goodrich et al. 2016. AFM	BES	$u^* > 0.1$ m/s. a 30-day moving window that advanced one day at a time and any half-hours that exceeded ± 2 standard deviations from the mean for that half-hour
Zona et al. 2011. Ecology	BES	$u^* > 0.1$ m/s. linear-gap filled ($<2\text{h}$)

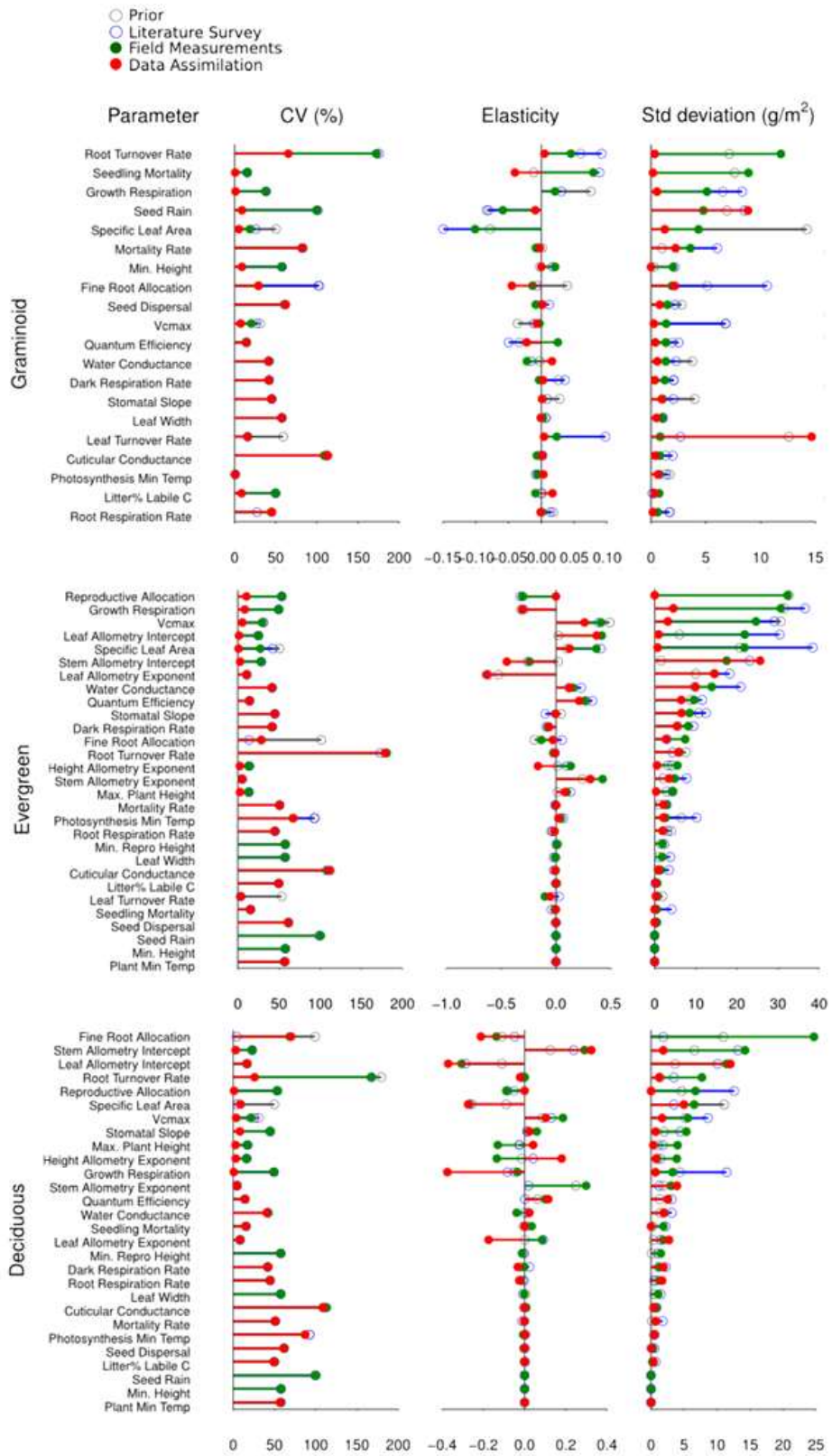
기로 한다. Moving-window 방법이란 각 데이터 포인트를 중심으로 앞뒤 window 사이의 평균값과 표준편차를 계산하여, 이 데이터 포인트가 표준편차를 벗어나는 경우 제거하는 방법이다. 일간 변화(diurnal change)와 연간 변화(seasonal change)의 차이를 고려하여 window-day와 window-hour를 각각 설정한다. 세 가지의 u^* -thresholds (0.2, 0.25, 0.3 m/s)와 두 가지의 window-day thresholds(5, 10 days), 두 가지의 window-hour thresholds(2, 3 hours), 5 가지의 표준편차 thresholds(1, 1.5, 2, 2.5, 3 stds)를 조합하여 총 60가지의 QA/QC 기준을 만들고 이상치(outlier)를 제거하였다. 이후, 2시간 이내에 2개 이상의 데이터 포인트가 이용가능할때 선형보간법(linear-interpolation)으로 겹을 메꿨다(2-hr linear gap-filling).

4. ED2-툰드라 모형 시스템 구축 및 예비 수치실험 수행

ED2 모형의 주요 모수들(표7)의 식생별 모수 자료(사전 분포 계수)를 식생타입(plant functional types, PFT; graminoid, evergreen shrub, deciduous shrub)별로 협동 연구자(Mike Dietz, 미국 Boston 대학)로부터 획득하였다. 이 모수 자료는 Toolik 지역에서 화재 후의 식생 성장을 모의하기 위해 ED2를 최적화한 연구(Davidson, 2012)를 바탕으로 하였다. 선행 연구에서 툰드라 식생의 생리적 프로세스 모의에 가장 중요한 주요 모수는 최대 카르복실화 속도(carboxylation max rate, V_{cmax}), 엽면적비(specific leaf area, SLA), 성장 호흡지수(growth respiration factor), fine root allocation 등으로 알려져 있다(그림39, Davidson, 2012). 식생별로 각 모수의 사전 분포 함수를 따르는 표본을 난수를 이용하여 무작위로 생성(Monte Carlo method)하여 총 1000세트의 모수 조합 세트를 구성하였다. 이 모수 세트로 구동한 모의 결과를 플릭스 측정치와 비교하여 최적의 모수 조합을 선택하도록 한다. 세 식생 중에는 상록관목의 결과가 전체 모의 결과에 가장 많이 영향을 미친다고 분석되었다. 식생계절(phenology)은 ED2의 기존 모듈을 사용하여 초목(graminoid)와 낙엽관목(deciduous shrub)은 온도제한(temperature-limited) 식생계절로 설정되었고, 상록관목(evergreen shrub)은 엽면의 계절적 변화가 없는 것(즉, evergreen)으로 설정되었다. US-Atq, US-Brw, Toolik 사이트의 토양은 선행 연구를 따라서 각각 양질토(loam), 모래(sand), 토탄(peat)으로 설정하였다(Davidson 2012).

<표7> ED2 모형 주요 모수

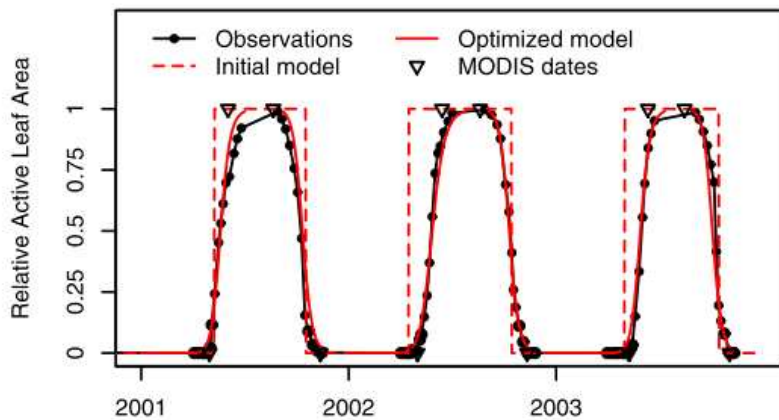
관련 프로세스	모수 이름	설 명
Photosynthesis and stomatal conductance (광합성 및 기공 전도 관련 속성)	Vm_low_temp	Temperature [°C] below which leaf metabolic activity begins to rapidly decline
	Vcmax (Vm0)	Maximum photosynthetic capacity at a reference temperature [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]
	stomatal_slope	Slope of the Ball/Berry stomatal conductance-photosynthesis relationship
	cuticular_cond	Intercept of the Ball/Berry stomatal conductance relationship [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]
	quantum_efficiency	Efficiency of using PAR to fix CO ₂
Jmax	Maximum rate of photosynthetic electron transport	
Respiration and turnover (호흡 및 순환 관련 속성)	growth_resp_factor	a constant fraction of net assimilation upon considering other components of respiration
	dark_respiration_factor	the rate of dark (leaf) resp. It is dimensionless b/c it is relative to Vm0.
	leaf_turnover_rate	the inverse of leaf life span [1/year]
	root_turnover_rate	the inverse of fine root life span [1/year]
Mortality and survivorship (고사 및 생존 관련 속성)	mort2	how poor the carbon balance needs to be before plants suffer large mortality rates.
	plant_min_temp	Below this, mortality rapidly increases.
Nitrogen and water stress (질소 및 수분 부족 관련)	c2n_leaf	Leaf carbon to nitrogen ratio
	water_conductance	Supply coefficient for plant water uptake [$\text{m}^2_{\text{ground}}/\text{kgC}_{\text{root}}/\text{sec}$]
Allocation and allometry (분배 및 상대성장 관련 속성)	SLA	specific leaf area (m^2/kg)
	q	fine root allocation
	b1Ht	DBH-height allometry intercept (m)
	b2Ht	DBH-height allometry exponent (m^{-1})
	b1Bs	DBH-stem allometry intercept
	b2Bs	DBH-stem allometry exponent
b1Bl	DBH-leaf allometry intercept	
b2Bl	DBH-leaf allometry exponent	
Reproduction and recruitment (번식 관련 속성)	seed_rain	External input of seeds. Density of seedling [$\text{kgC}/\text{m}^2/\text{year}$]
	r_fract	Fraction of (positive) carbon balance devoted to reproduction
	repro_min_h	Min height plants need to attain before allocating to reproduction



<그림39> Toolik에서 화재 후 식생성장 모의에 최적화된 ED2모형 모수의 식생타입별 중요도 (Davidson, 2012)

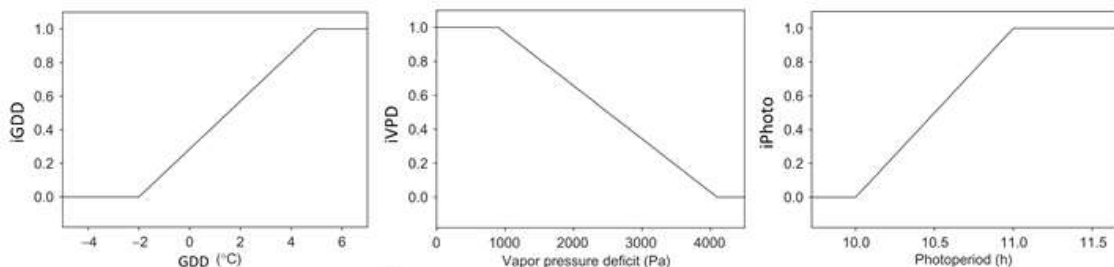
5. ED 식생계절 모듈 개선

기존 ED2의 낙엽 식생(deciduous vegetation) 식생계절(phenology) 모듈은 (1) 온도나 토양 수분에 따른 엽면의 유·무만 모의하거나 (2) 엽면 성장 함수 계수의 사전 설정(prescribed phenology coefficients)을 필요로 한다(그림40, Medvigy et al., 2009). 본 연구에서는 기후변화에 따른 엽면의 계절적 패턴 변화를 모의하기 위해 선행 연구를 바탕으로 하여 구현한 성장기간지수(growing season index, iGSI, 식1; Jolly et al., 2005)를 식생계절 모듈에 삽입하였다. 이 성장기간지수(iGSI)는 세 기후인자(growing degree day, 수증기압포차, 일장



<그림40> 기존의 ED2 식생모듈(initial 버전과 사전설정 계수사용버전, Medvigy et al., 2009)

$$iGSI = iGDD \times iVPD \times iPhoto \quad (\text{식1})$$



<그림41> 성장기간지수(iGSI)를 계산하기위한 세 기후인자(GDD, VPD, Photoperiod) 선형함수(Jolly et al., 2005)

(photoperiod)) 각각의 선형 함수(그림41, 식2)를 승법적으로 취합한 함수(multiplicative function)이다. Growing degree day는 봄(greenup-maturity)과 가을(senescence-dormancy)에 따라 다른데, 봄에는 heating degree day(HDD, 1월1일부터 기준온도 0℃ 이상인 날들의 온도의 합)이고, 가을에는 chilling degree day(CDD, 8월1일부터 기준온도 20℃ 이하인 날들의 온도의 합)를 의미한다. 각 기후인자의 선형함수(식2)는 최소·최대 한계치(min and max thresholds) 이상·이하에서는 0(혹은 1)의 값을 가짐으로써 식생의 생리적 현상(즉, 광합성 및 증발산)에 영향을 미치지 않는다. 각 기후인자의 선형함수의 최소·최대 한계치는 MODIS(MODERate resolution Imaging Spectroradiometer) 자료를 바탕으로 계산된 phenology estimates(MCD12Q2.v006)의 greenup, maturity, senescence, dormancy 타이밍에 해당하는 날(day of year)의 15년(2001-2016년) 평균치로 정하였다.

$$iVPD = \begin{cases} 0 & \text{if } VPD \leq VPD_{\min} \\ \frac{VPD_{obs} - VPD_{\min}}{VPD_{\max} - VPD_{\min}} & \text{if } VPD_{\max} > VPD > VPD_{\min} \\ 1 & \text{if } VPD \geq VPD_{\max} \end{cases} \quad (\text{식2})$$

극지연구소

6. 알래스카 지역 ED2-툰드라 모형 구축

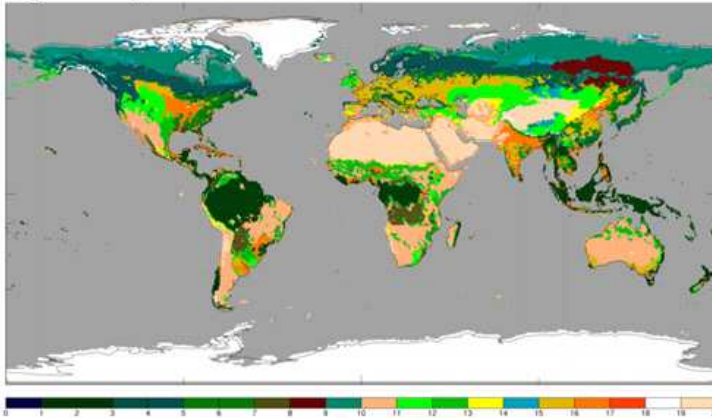
알래스카 지역의 식생 엽면적지수(LAI)와 밀도(vegetation density)는 미항공우주국(NASA) Goddard Institute for Space Studies (GISS)의 협동 연구자(Dr. Nancy Kiang)로부터 제공받은 Ent-GVSD (Ent Global Vegetation Structure Dataset)을 바탕으로 초기화하였다(그림42). Ent-GVSD는 전지구 Ent Terrestrial Biosphere Model (Ent TBM)을 구형하기 위해 개발되고 있는 전지구 식생 경계조건(boundary condition)으로써, ICESat/GLAS 데이터와 MODIS 데이터를 이용하여 추산한 식생타입별 높이(vegetation height)와 엽면적지수(LAI, monthly and annual)를 제공한다. Ent-GVSD는 상록관목(evergreen shrub)과 낙엽관목(deciduous shrub)의 엽면적지수의 총합인 cold-adapted shrub 엽면적지수를 제공한다. 원격탐사데이터를 바탕으로 한



Goddard Institute for
Space Studies

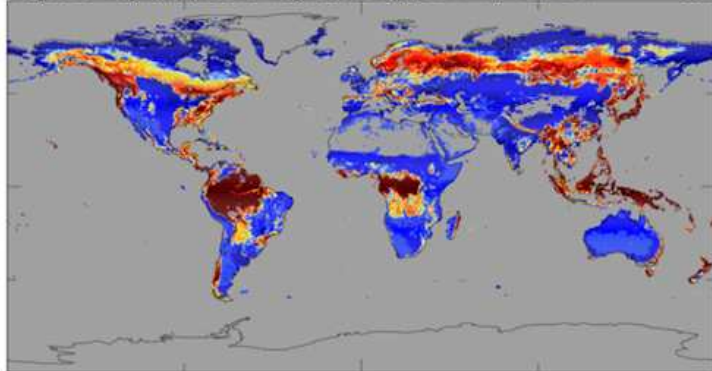
Ent TBM Global Vegetation Structure Data Set (Ent GVSD)

Vegetation Type



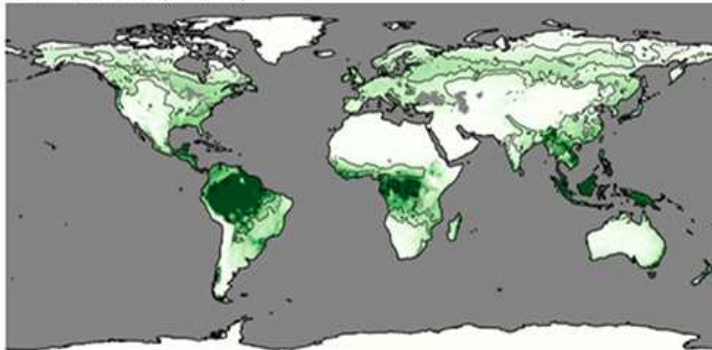
Vegetation heights (m) (cover-weighted average, all PFTs) - Ent TBM

6.52



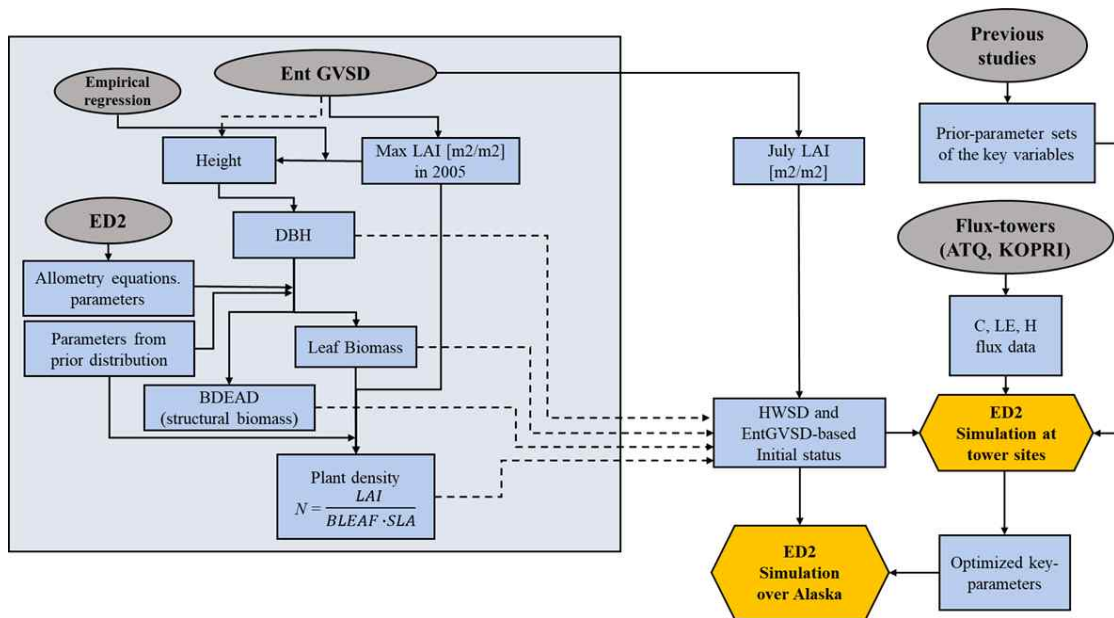
0.51 2 3 4 5 7.5 10 12.5 15 17.5 20 40.3

Leaf Area Index (m²/m²)



0 1 2 3 4 5

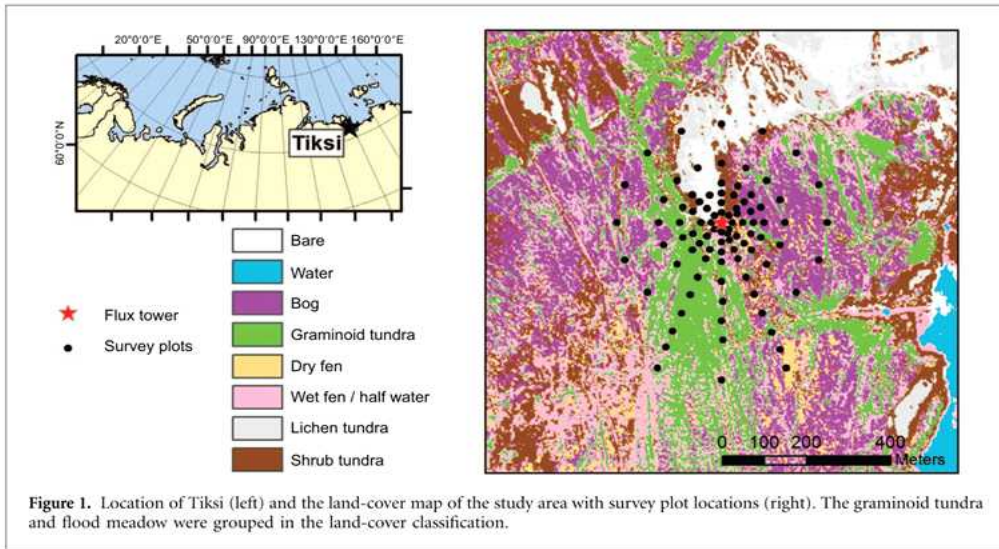
<그림42> 식생 엽면적지수(LAI)와 밀도(vegetation density) 초기화에 사용된 Ent-GVSD 데이터
(자료제공: Nancy Kiang at NASA GISS)



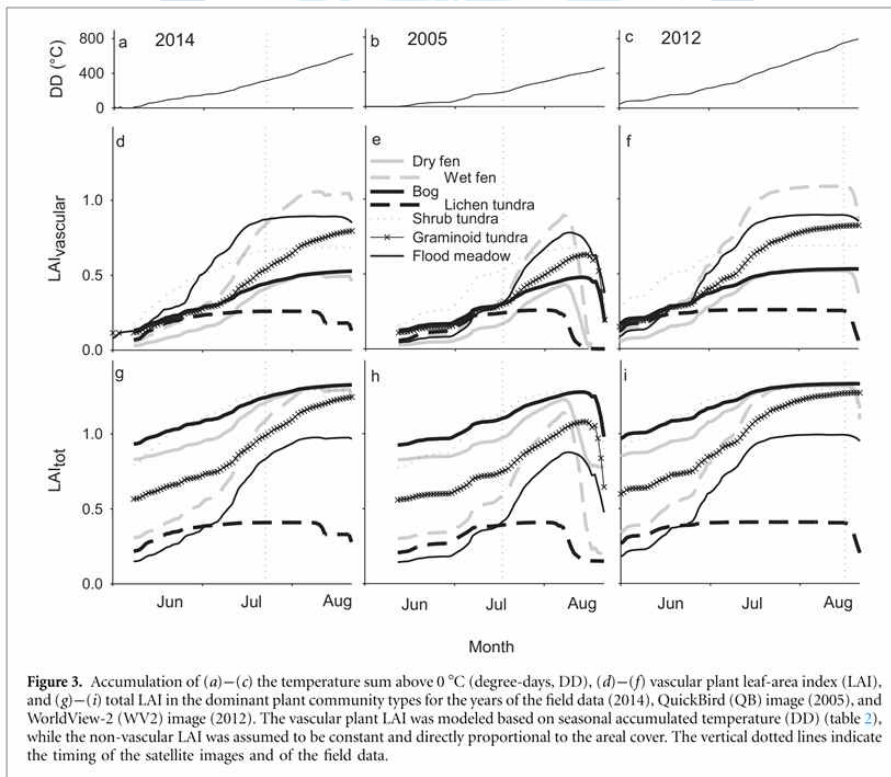
<그림43> 알래스카 지역 ED2-툰드라 모형 구축 체계도

Ent-GVSD 엽면적지수 1월 자료는 적설로 인한 오차가 있을 수 있으므로, Ent-GVSD 엽면적지수 7월 자료에서 현장에서 측정한 동일 혹은 유사 낙엽관목(deciduous shrub)의 계절적 변화량(Juutinen et al., 2017, 그림44, 45)외의 엽면적지수를 상록관목(evergreen shrub)으로 분류하였다. 식생타입별 밀도는 엽면적지수 추산량과 ED2의 allometric equation을 바탕으로 계산하였다(그림43).

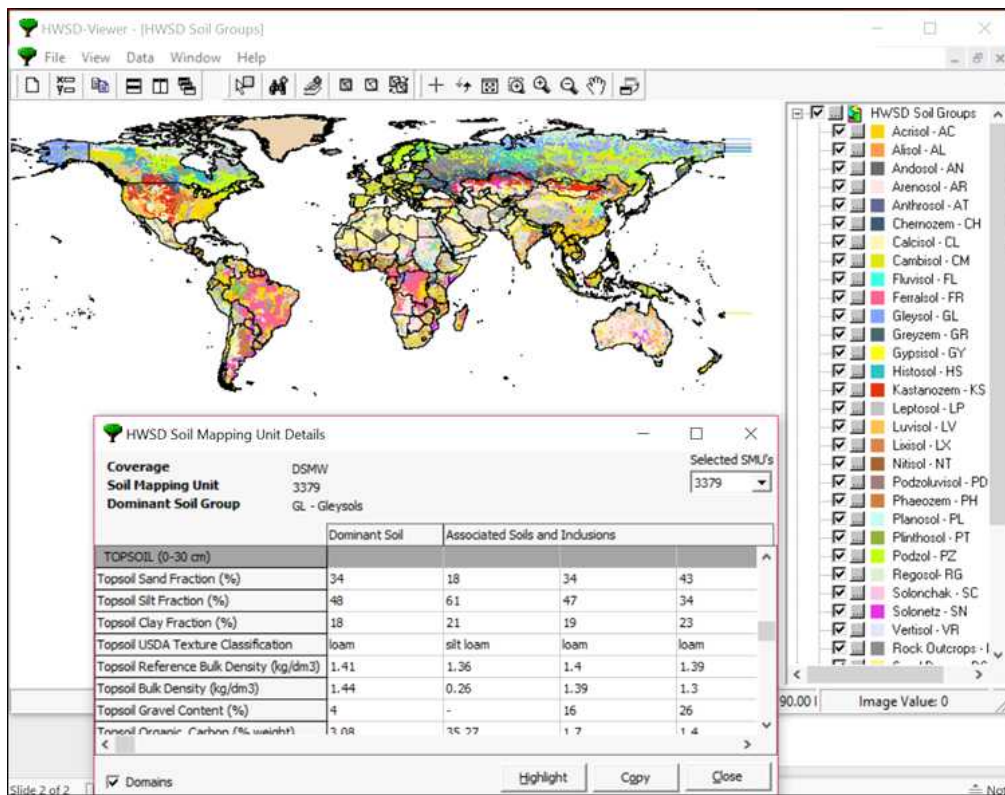
토양내 탄소와 질소의 비율을 측정한 선행 연구(Post et al., 1985, 표4)와 IIASA과 FAO(유엔식량농업기구)에서 제공하는 Harmonized World Soil Database(HWSD)의 토양 유기탄소(soil organic carbon, SOC) 추정치(그림46)를 바탕으로 알래스카 지역 토양 유기질소(soil organic nitrogen, SON), 토양 탄소 및 질소 집적소(fast, slow carbon and nitrogen pools)를 추산하였다. 또한, 미항공국(NASA JPL)의 협동 연구자로부터 제공받은 알래스카 지역 평균 토양 활동층 깊이(mean active layer thickness) 추산 자료(Yi et al., 2018, 그림47)로 각 그리드별 동토층 깊이를 초기화하였다. 모형 구동시, 지표면 온도로부터 토양의 층(layer)마다 온도와 수분, liquid water fraction이 전달(propagation)이 계산되고, 동토층 깊이 변동이 모의된다.



<그림 44> 툰드라 낙엽관목(deciduous shrub)의 엽면적지수(LAI) 측정장소(Juutinen et al., 2017)



<그림 45> 툰드라 낙엽관목(deciduous shrub)의 엽면적지수(LAI) 측정량과 추산량(Juutinen et al., 2017)

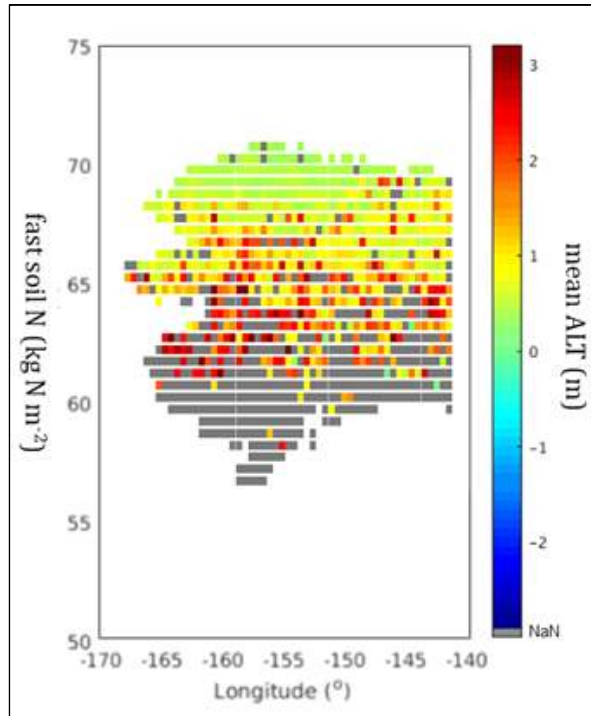


<그림46> Harmonized World Soil Database (UN-FAO)

극지연구소

<표8> 툰드라 토양내 탄소와 질소 비율 (Post et al., 1985)

Life Zone	No. of samples	Carbon (g m ⁻³)		Nitrogen (g m ⁻³)		C/N ratio	
		Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Dry tundra	5	3.1	2.2	-			
Moist tundra	12	10.9	6.4	638.5	231.7	18.3	6.5
Wet tundra	33	20.7	16.0	1251.3	958.1	18.4	6.4
Rain tundra	8	36.6	12.9	2226.0	593.6	15.6	2.8

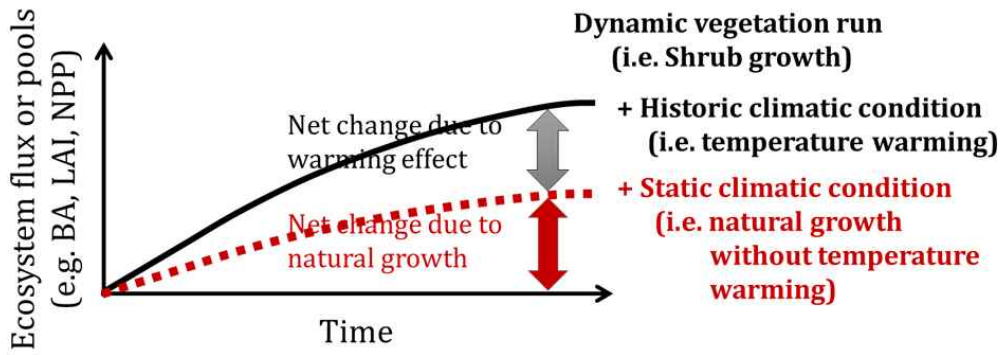
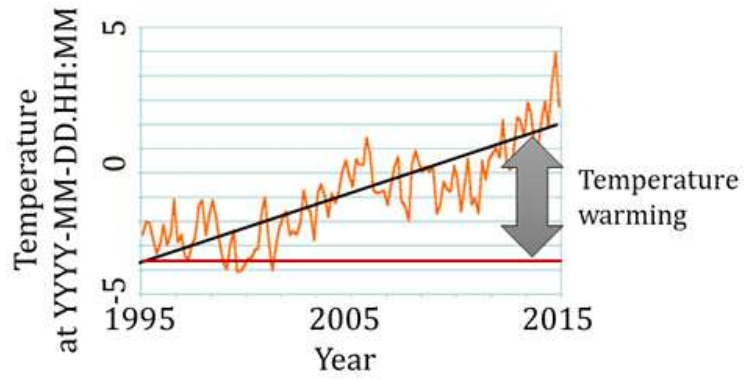


<그림47> 알래스카 지역 동토층(mean Active Layer Depth) 추산량
(자료제공: Yonghong Yi at NASA JPL)

극지연구소

7. 다중 기후 조건 장기 수치실험 수행

21년간의(1995-2015년) 알래스카 식생 성장 및 탄소 순환 변화를 ED2-tundra 모형으로 모의한 후, 21년간 각 그리드 내의 식생 성장 및 탄소 플럭스 장기변화의 정도(rate)와 유의수준(p -value)을 산출하였다(Mann-Kendall 검정). 이렇게 모의된 탄소 순환(즉, 순생태계교환량 NEE)의 변화는 관목 성장 및 확장과 장기 기후변화의 영향이 합쳐진 변화(coupled-effect)이다. 따라서 1995년의 기온으로 모의한 결과(static-run)를 관측 대기온도의 모의 결과(historic-run)에서 제거하여, 관목 성장 및 확장에 의한 순영향(net effect)의 장기 변화와 기후 변화(즉, 기온 상승)에 의한 장기 변화를 분리(decoupling)시키는 실험을 수행하였다(그림48). 이렇게 분리된 관목 성장 및 확장에 의한 장기 변화의 순영향(net effect)과 기후 변화(즉, 기온 상승)에 의한 장기 순변화의 계절적 변이를 고찰하였다.



<그림48> 관목성장과 기온상승 분리(decoupling) 모식도

제 2 절 연구결과

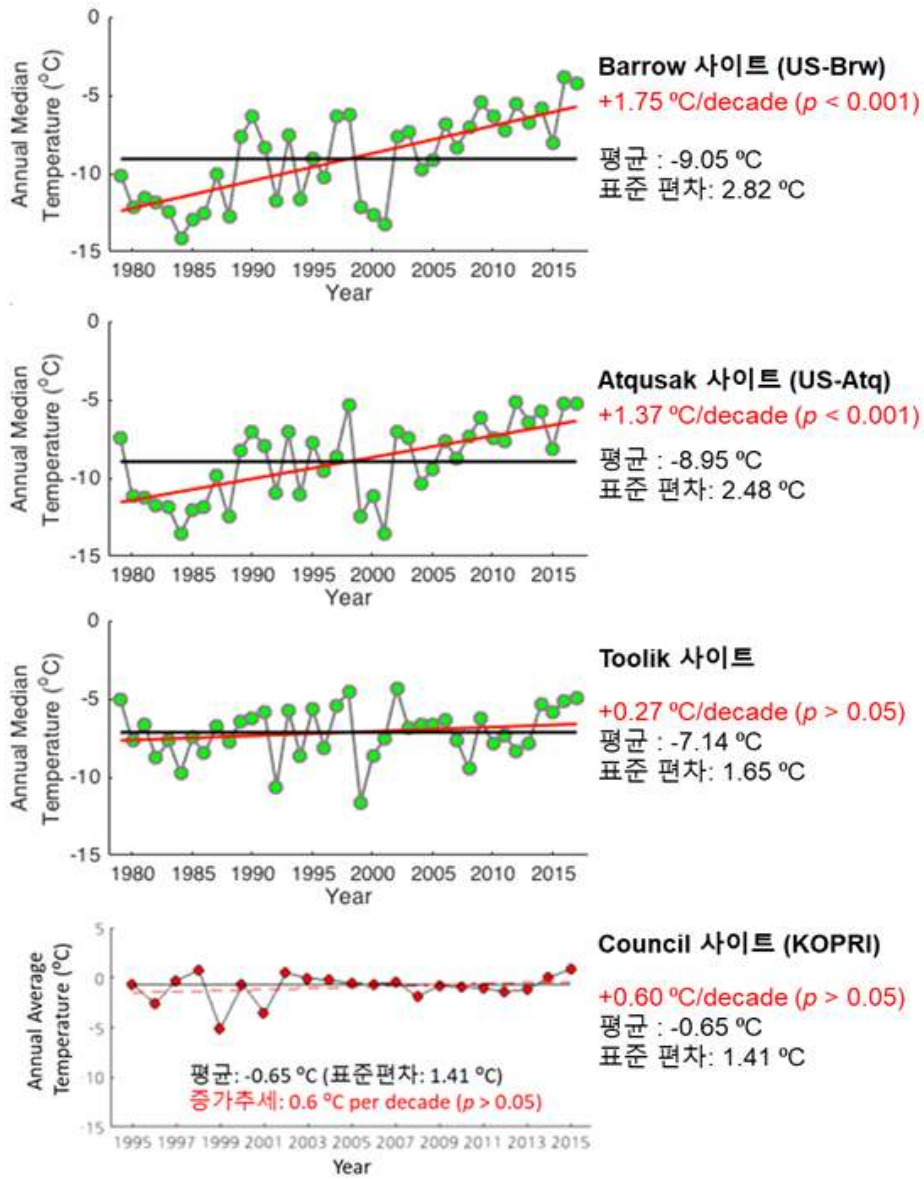
1. 주요 사이트 기상자료 분석 결과

ED2 모형 구동을 위해 필요한 기상자료 중(대기 온도, 강수량, 장파장 복사량, 단파장 복사량, 지표면 대기압, 대상류 및 자오면류 풍속, 비습도; 부록1-주요 사이트 기상자료), 관목 성장 및 확장에 가장 많은 영향을 미친다고 추정된 대기 온도와 강수량에 대하여 지난 39년간(1979-2017년)의 통계치(평균, 표준편차, 장기경향)을 계산하였다.

지난 39년간 (1979-2017년) 주요 사이트에서 연평균 온도의 평균은 -9.05°C 에서 -0.65°C 사이로 나타났다(그림49). US-Brw 사이트($71^{\circ} 19'21.00''\text{N}$, $156^{\circ} 36'33.012''\text{W}$)의 연평균 온도는 -9.05°C (표준편차: 2.82°C)로써 가장 낮았고, US-Atq 사이트($70^{\circ} 28'10.56''\text{N}$, $157^{\circ} 24'32.04''\text{W}$)의 연평균 온도는 -8.95°C (표준편차 2.48°C)는 그에 근접했다. 반면, Toolik station 사이트 ($68^{\circ} 37'59.96''\text{N}$, $149^{\circ} 33'59.12''\text{W}$)의 연평균 온도는 -7.14°C (표준편차 1.65°C), 극지연구소 사이트 ($64^{\circ} 50'38.4''\text{N}$, $-163^{\circ} 42'39.6''\text{W}$)의 연평균 온도는 -0.65°C (표준편차 1.41°C)였다. 고위도에 위치한 US-Atq와 US-Brw 사이트에서 연평균 온도가 낮은 반면 표준편차(39년간 연간변동)은 그보다 저위도에 위치한 Toolik station과 극지연구소 사이트에 비해 컸고, 39년간 연평균 온도가 통계적으로 유의미하게 상승하였다(매 10년간 각 사이트에서 1.75 , 1.37°C 씩 상승; $p < 0.001$).

<표9> 주요 사이트 연평균 온도 통계

주요 사이트	좌 표	연평균 온도($^{\circ}\text{C}$)	표준편차 ($^{\circ}\text{C}$)
US-Brw	$71^{\circ} 19'21.00''\text{N}$, $156^{\circ} 36'33.01''\text{W}$	-9.05	2.82
US-Atq	$70^{\circ} 28'10.56''\text{N}$, $157^{\circ} 24'32.04''\text{W}$	-8.95	2.48
Toolik station	$68^{\circ} 37'59.96''\text{N}$, $149^{\circ} 33'59.12''\text{W}$	-7.14	1.65
극지연구소	$64^{\circ} 50'38.40''\text{N}$, $163^{\circ} 42'39.60''\text{W}$	-0.65	1.41



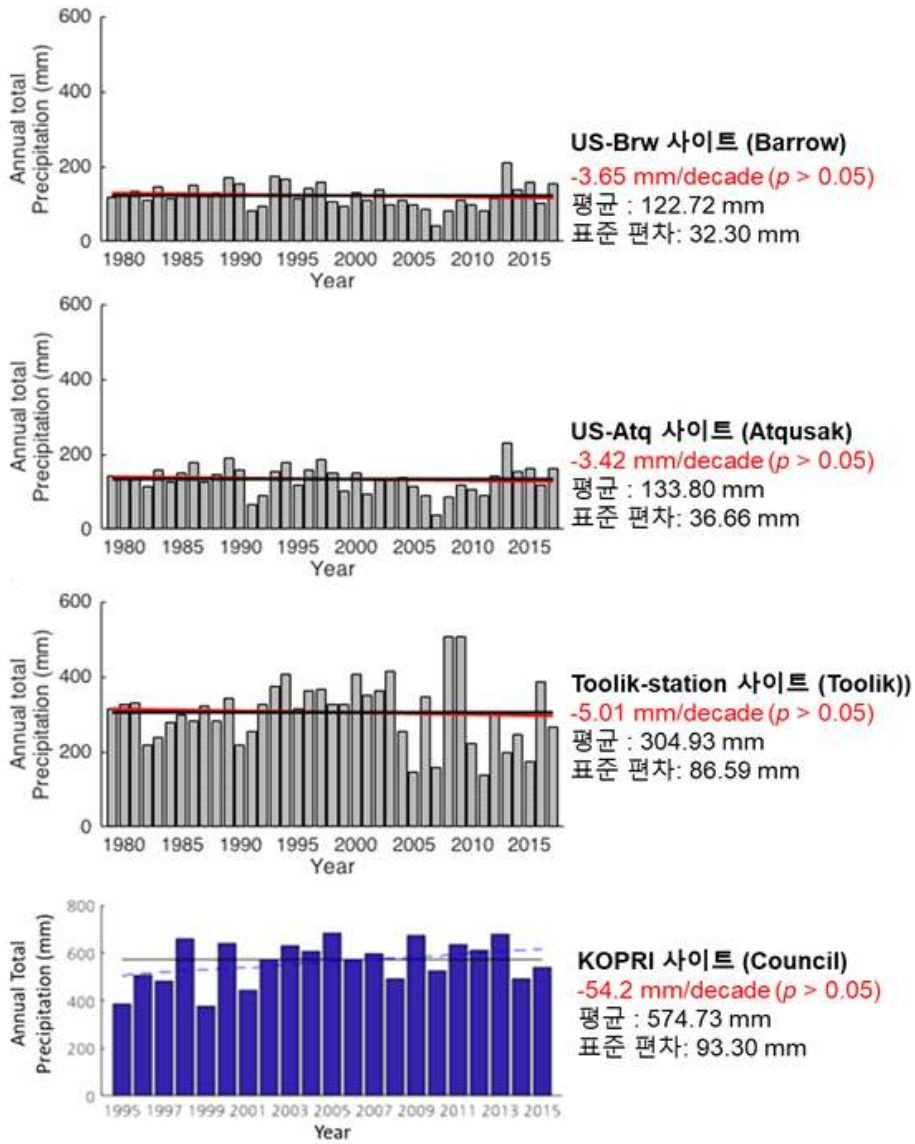
<그림49> 지난 39년간 (1979-2017년) 연평균 온도 분석:
 평균(mean), 표준편차, 장기 경향 (Mann-Kendall 검정)

<표10> 주요 사이트 연강수량 통계

주요 사이트	위치	연강수량 (mm)	표준편차(mm)
US-Brw	71° 19'21.00"N, 156° 36'33.012"W	112.72	32.30
US-Atq	70° 28'10.56"N, 157° 24'32.04"W	133.80	36.66
Toolik station	68° 37'59.96"N, 149° 33'59.12"W	304.93	86.59
극지연구소	64° 50'38.4"N, -163° 42'39.6"W	574.73	93.30

지난 39년간 (1979-2017년) 주요 사이트에서 연강수량은 112.72 mm에서 574.73 mm 사이로 나타났다(그림50). US-Brw 사이트의 연평균 강수량은 112.72 mm(표준편차: 32.30 mm)로써 가장 낮았고, US-Atq 사이트의 연평균 강수량은 133.80 mm(표준편차 36.66 mm)는 그에 근접했다. 반면, Toolik station 사이트의 연평균 강수량은 304.93 mm(표준편차 86.59 mm), 극지연구소 사이트의 연평균 강수량은 574.73 mm(표준편차 93.30 mm)였다. 연평균 강수량은 연평균 온도와 비슷하게 위도에 따라 변화하는 패턴을 보였다. 고위도에 위치한 US-Atq와 US-Brw 사이트에서 연강수량과 표준편차(39년간 연간변동)이 그보다 저위도에 위치한 Toolik station과 극지연구소 사이트에 비해 적었고, 연평균 온도와는 다르게 네 사이트에서 모두 39년간 통계적으로 유의미하게 변하지 않았다($p > 0.05$).

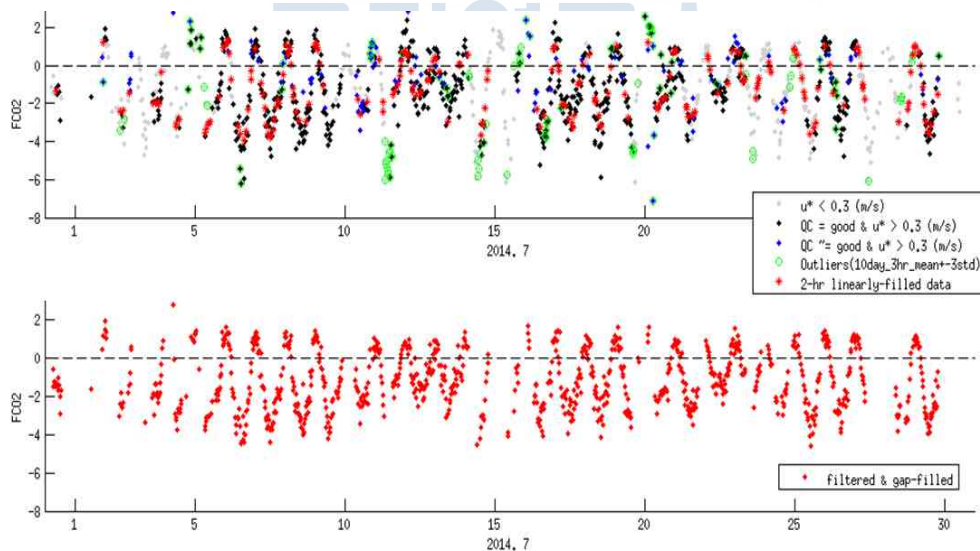
대기 기온은 장기적으로 상승하고 있는 것에 비해 연강수량의 장기적 변화 추세는 없는 현재의 추세가 계속될 경우, 토양 수분의 감소로 인한 식생 성장 저하 혹은 고사가 발생할 가능성이 올라갈 거라 예상된다.



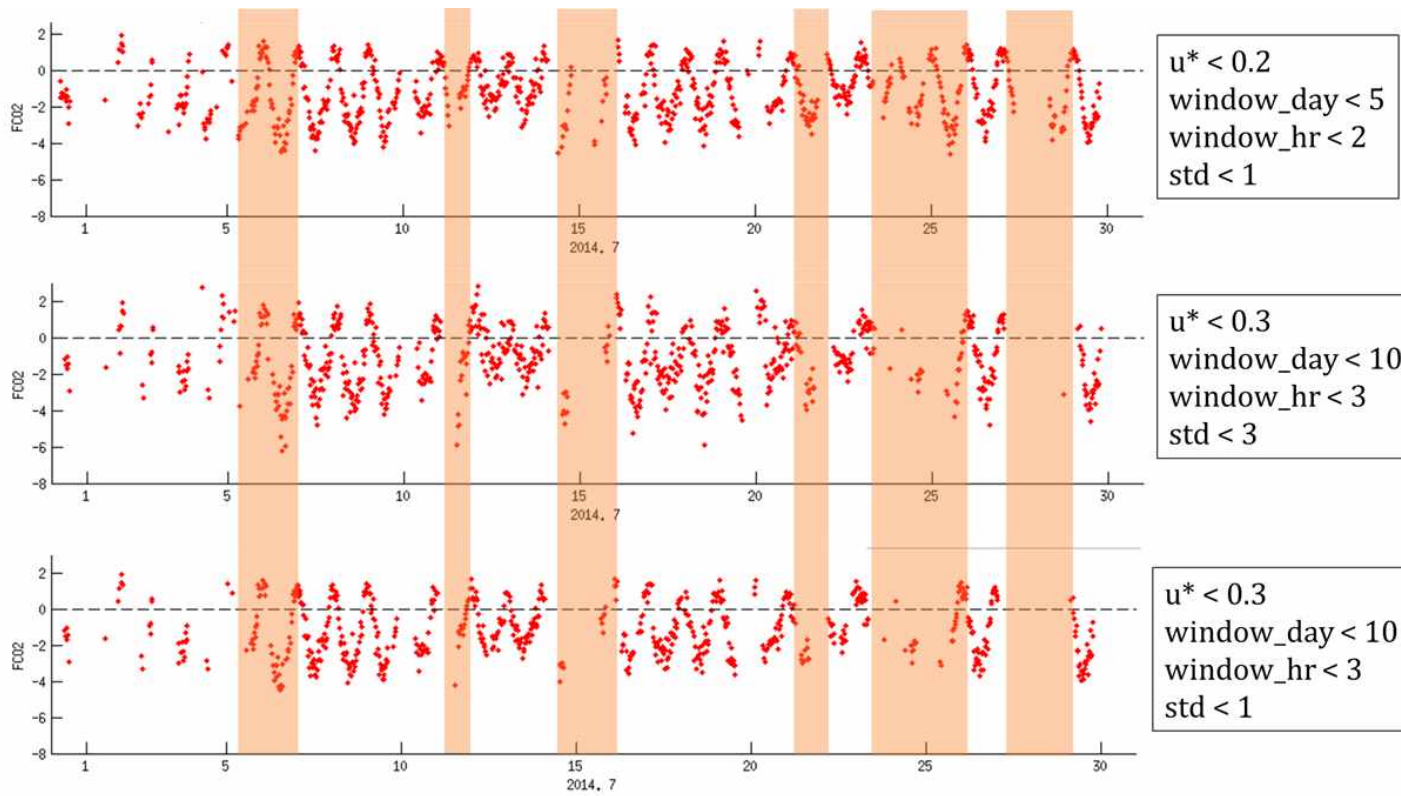
<그림50> 지난 39년간 (1979-2017) 연강수량 분석:
 평균(mean), 표준편차, 장기 경향 (Mann-Kendall 검정)

2. 플럭스 자료 프로세싱 결과

US-Brw 타워, US-Atq 타워, 극지연구소 타워에서 측정된 순생태계교환량(net ecosystem exchange, NEE)과 증발산(Evapotranspiration, ET) 플럭스(부록2-플럭스 자료) 중. QA/QC 플래그가 없는 US-Brw 타워 플럭스 자료의 quality control을 위해 선행 연구들을 바탕으로 u^* -threshold 방법과 moving-window 방법으로 프로세싱하였다. 총 60 가지 조합(3가지 u^* -thresholds: 0.2, 0.25, 0.3 m/s, 2 window-days: 5, 10 days, 2 window-hours: 2, 3 hours, 5 standard deviations: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 stds)의 범위에서 벗어나는 데이터 포인트는 제거한 후 2시간 이내에 2개 이상의 데이터 포인트가 존재할 때 선형보간법(linear-interpolation)으로 갭필링을 실행한 결과(2-hr linear gap-filling, 그림 51), 이상치(outlier)의 수가 현저히 줄어들음을 볼 수 있다. 하지만 조건에 따른 일별 최대 플럭스의 필터링 결과의 차이가 매우 커서(그림52) 모형 모수 최적화의 결과에 유의미한 영향을 줄 수 있으므로, 자료 책임자(US-Brw P.I.)의 공식 QA/QC 플래그가 이용가능할 때까지 US-Brw 타워 자료의 사용은 유보한다.



<그림51> US-Brw 타워 플럭스 자료 quality control 프로세스 예시



<그림52> 필터링 조건에 따른 US-Brw 타워
 플럭스 자료 프로세스 결과

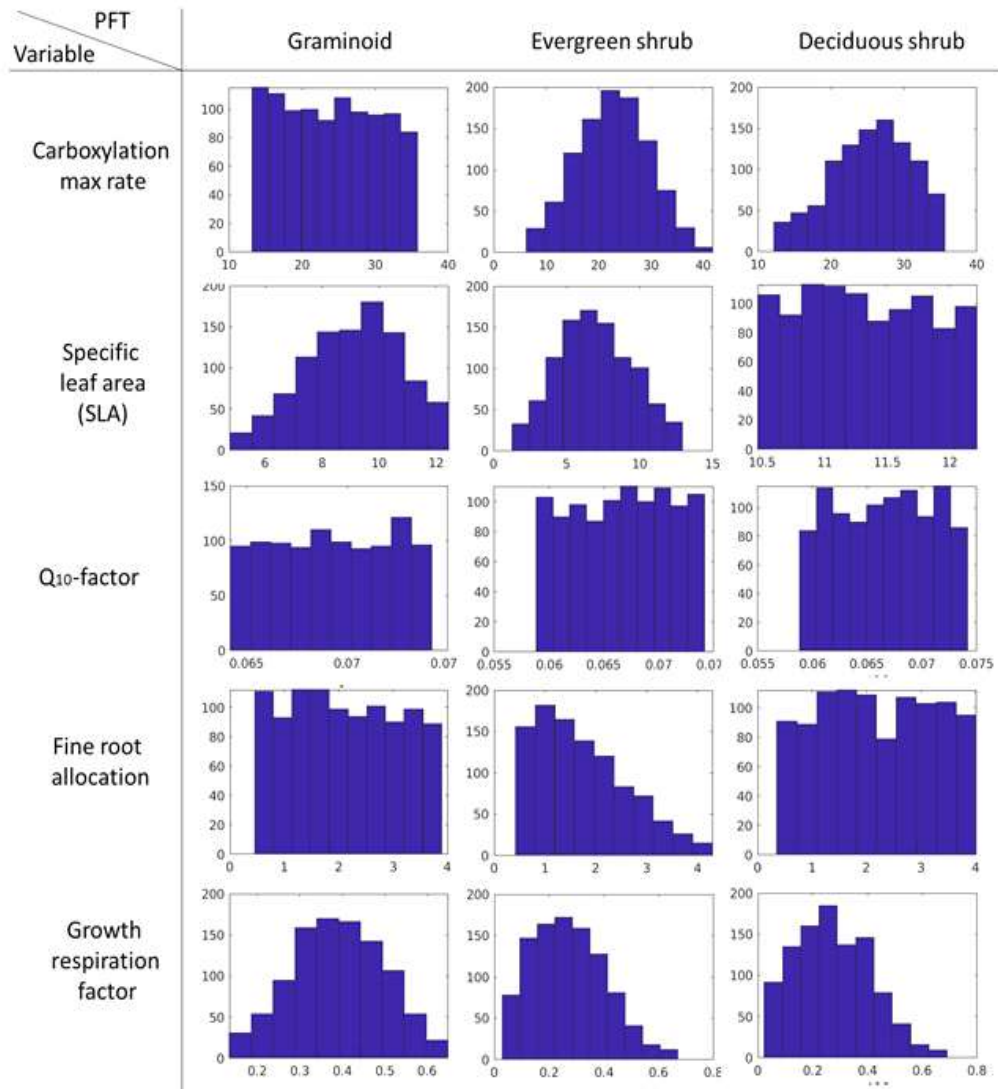
3. ED2-툰드라 모형 예비 수치실험 수행 결과

선행 연구들을 바탕으로 한 식생 및 지면 과정 관련 주요 모수의 가능 범위에 대한 사전 분포(prior distribution, 그림53)의 계수를 수집하고(표11), 이러한 사전 분포 함수를 따르는 표본을 난수를 이용하여 무작위로 생성(Monte Carlo method)하여 총 1000개의 모수 조합을 구성하였다(그림53). Carboxylation max rate, Specific Leaf Area(SLA), growth respiration rate, fine root allocation, Growth respiration factor 등 육상생태계 플럭스에 영향이 크고 현장에서 측정시 불확실성이 큰 모수들의 가능 범위가 넓게 구성되었다.

총 1000개의 모수 조합 중 최적화된 모수의 조합으로 구동한 ED2-툰드라의 모의 결과, 극지연구소 사이트에서 측정한 30분 간격 순생태계교환량(NEE) 플럭스

<표11> 식생별 주요 모수 사전분포(prior distribution) 계수

Plant Function Type (PFT)	Trait	Distribution	Parameter	
			a	b
Graminoid	Carboxylation max rate	Uniform	12	35
	Specific Leaf Area(SLA)	Log-normal	9	1.5
	Q ₁₀ -factor	Uniform	0.064	0.074
	Fine root allocation	Uniform	0.5	3.9
	Growth respiration factor	Beta	4.06	7.2
Evergreen Shrub	Carboxylation max rate	Weibull	3.55	24.7
	Specific Leaf Area(SLA)	Normal	7.8	0.9
	Q ₁₀ -factor	Uniform	0.06	0.07
	Fine root allocation	Log-normal	0.81	0.84
	Growth respiration factor	Beta	4.06	7.2
Deciduous Shrub	Carboxylation max rate	Weibull	3.55	24.7
	Specific Leaf Area(SLA)	Uniform	10.5	12.2
	Q ₁₀ -factor	Uniform	0.06	0.074
	Fine root allocation	Uniform	0.5	4
	Growth respiration factor	Beta	4.06	7.2



<그림53> 식생별 주요 모수 사전분포 (prior distribution)

변동의 58%를 모의 가능하였고($r^2 = 0.58$; 2014, 2015년 각각 $r^2 = 0.604$, 0.603; 그림54), 30분 간격 증발산(ET) 플럭스 변동의 7%를 모의 가능하였고($r^2 = 0.07$; 2014, 2015년별 $r^2 = 0.067$, 0.073; 그림54). 또한, US-Atq 타워에서 측정된 30분간격 NEE 플럭스 변동의 53%를 모의 가능하였고($r^2 = 0.53$;

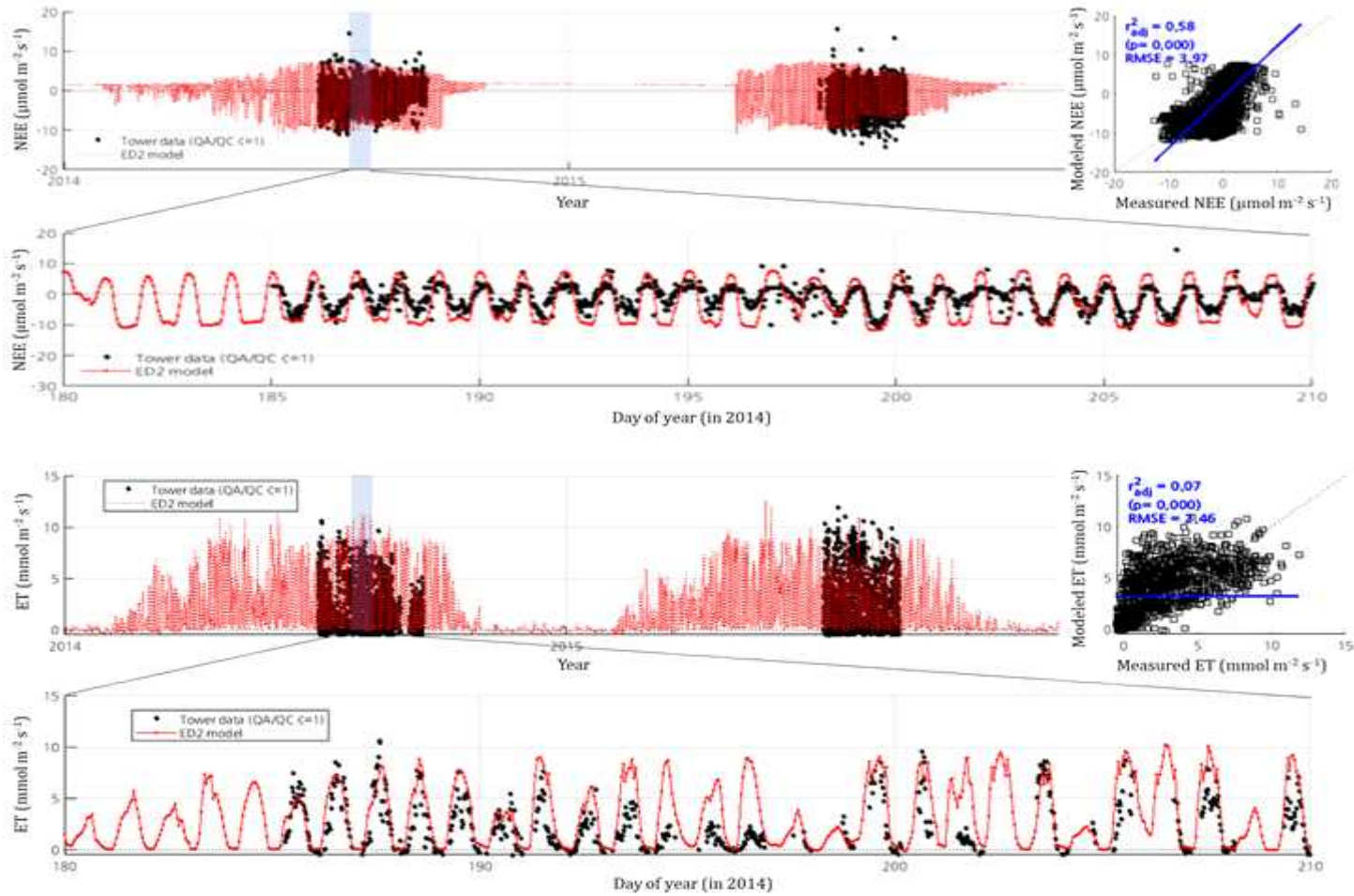
<표12> 극지연구소 타워 30분 간격 순생태계교환량 (NEE) 및 증발산(ET) 플럭스 모의 결과

Flux	Year	r_{adj}^2	RMSE
Net Ecosystem Exchange (NEE)	2014	0.605	4.088
	2015	0.603	3.572
Evapotranspiration (ET)	2014	0.067	3.014
	2015	0.073	2.461

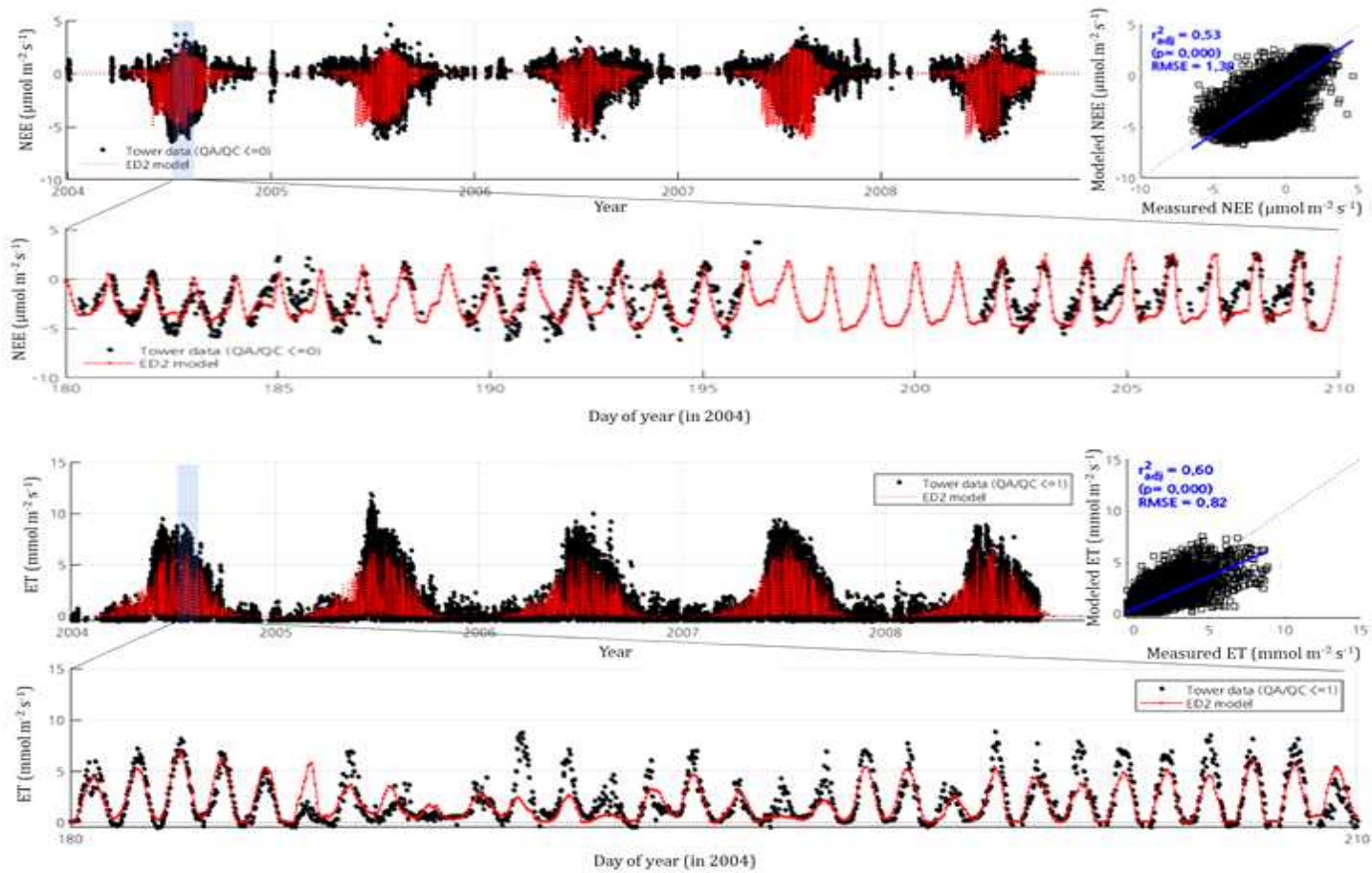
2004-2008 년 각각 $r^2 = 0.487-0.658$; 그림55), 30분 간격 증발산(ET) 변동의 60%를 모의 가능하였다($r^2 = 0.60$; 2004-2008 년별 $r^2 = 0.581-0.768$; 그림55). 선행 연구결과들은 대체로 일간(daily) 혹은 월간(monthly) 시간 분해능으로 모형을 구현하였거나, 30분 간격 모형의 결과는 대체로 측정자료 변동의 40% 가량을 모의 가능하는 것에 미루어($r^2 < 0.50$; Fisher et al., 2014), ED2 모형의 모의 결과가 우수함을 알 수 있다.

<표13> US-Atq 타워 30분 간격 순생태계교환량(NEE) 및 증발산(ET) 플럭스 모의 결과

Flux	Year	r_{adj}^2	RMSE
Net Ecosystem Exchange (NEE)	2004	0.658	1.001
	2005	0.491	1.269
	2006	0.487	1.200
	2007	0.587	1.361
	2008	0.567	1.280
Evapotranspiration (ET)	2004	0.664	0.761
	2005	0.696	0.776
	2006	0.581	0.708
	2007	0.768	0.713
	2008	0.602	0.816



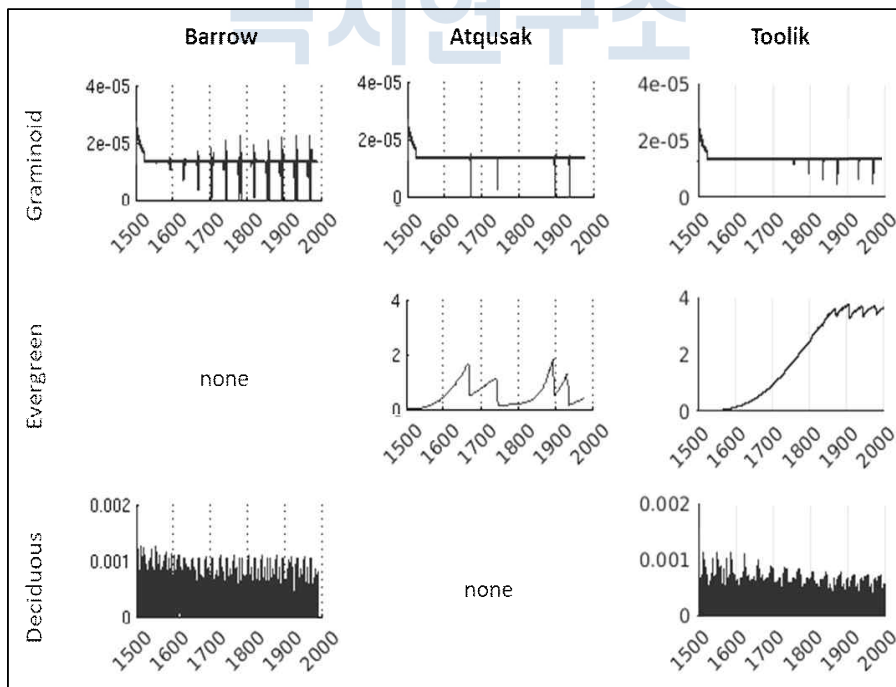
<그림54> 극지연구소 타워 30분 간격 순생태계교환량(NEE) 플럭스와 증발산(ET) 플럭스 모의 결과



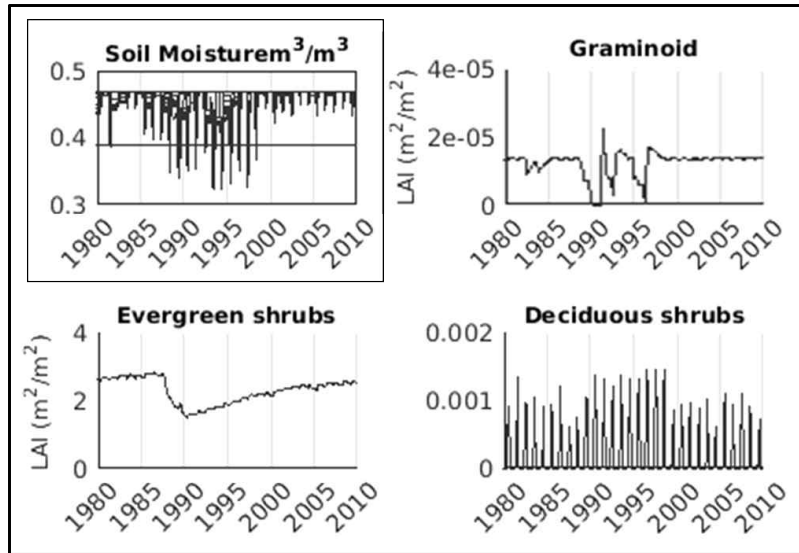
<그림55> US-Atq 타워 30분 간격 순생태계교환량(NEE) 플럭스와 증발산(ET) 플럭스 모의 결과

세 사이트(Atqusak, Barrow, Toolik)에서의 식생 안정화 (stabilization) 수치 실험 결과(500년 spin-up), 초목(graminoid)와 낙엽관목(deciduous shrub)은 기후 후 경년변동에 의한 변동을 제외한 장기적 추세가 안정화되었다(그림56). 즉, 중요 식생 특성들 중 하나인 엽면적지수(LAI)의 값이 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 한편, 상록관목(evergreen shrub)은 Atqusak 사이트에서는 수십년마다 급격한 엽면적지수(LAI)의 감소가 발생한 반면, Toolik 사이트에서는 점진적으로 증가하다가 350년 후부터는 소량의 경년변동을 제외한 큰 추세는 안정화되는 양상을 보였다. 이는 낙엽관목(deciduous shrub)보다 토양 수분에 더 민감한 상록관목(evergreen shrub)의 Atqusak 지역의 건조한 기후에 대한 생리적 반응이라고 볼 수 있다.

대기 기온은 장기적으로 상승하고 있는 것에 비해 연강수량의 장기적 변화 추세는 없는 현재의 추세가 계속될 경우(그림49, 50), 토양 수분의 감소로 인한 식생 성장 저하가 발생할 수 있다. 식생 안정화 수치실험 결과, 1980년대 후반에서 1990년대에 걸쳐 토양 수분감소에 의한 초목(graminoid)과 상록관목(evergreen shrubs)의 성장 저하가 모의된 것을 확인하였다(그림57). 이로 미루어, ED2 모형에서 이러한 기후 변화(즉 기온 상승에 의한 가뭄 발생)에 의한 식생별 생리적 반



<그림56> 주요 사이트에서의 식생타입별(Plant Functional Type, PFT) 안정화(stabilization) 수치실험



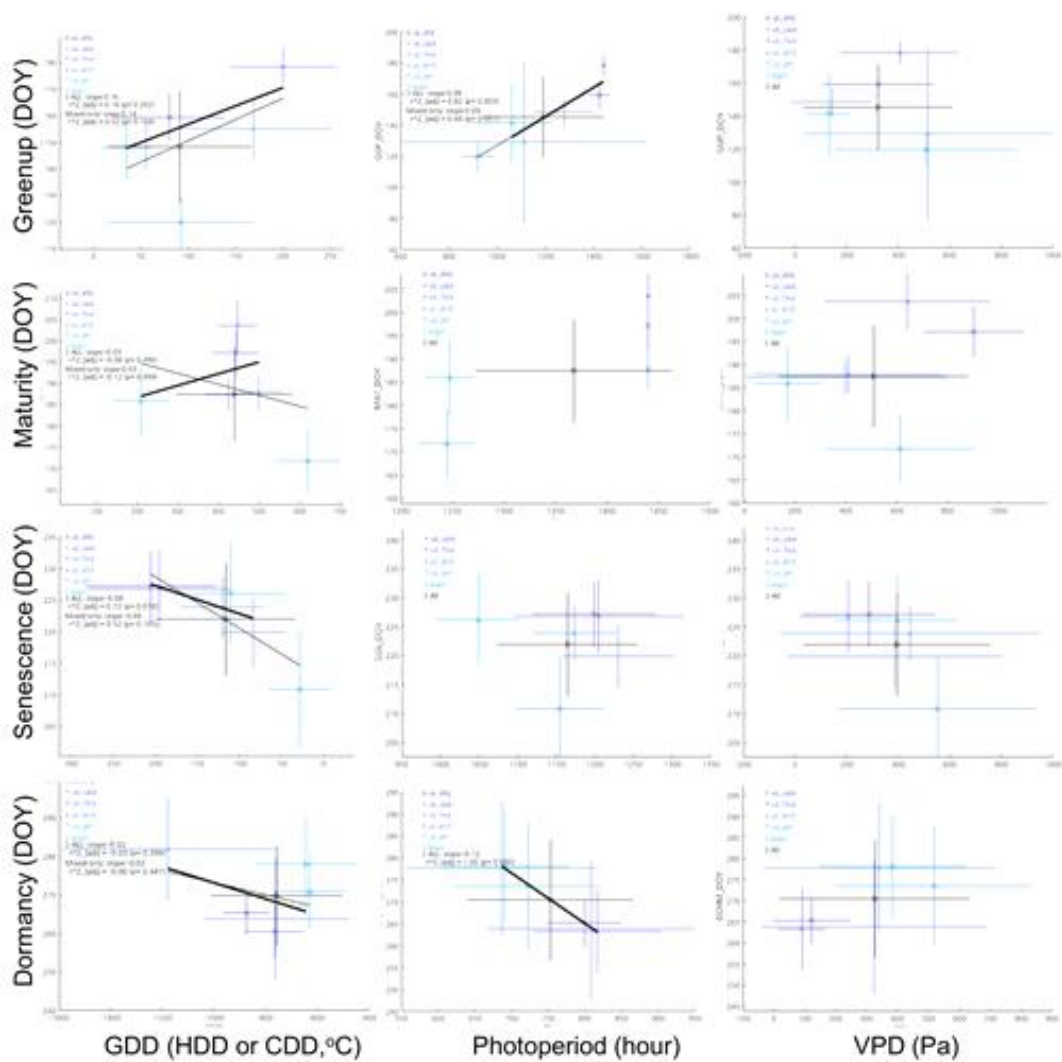
<그림57> 토양 수분 감소에 따른 식생 반응 모의 테스트

응과 그로 인한 알래스카 지역의 생지화학 순환 변화의 모의가 가능할 것이라고 예상할 수 있다.



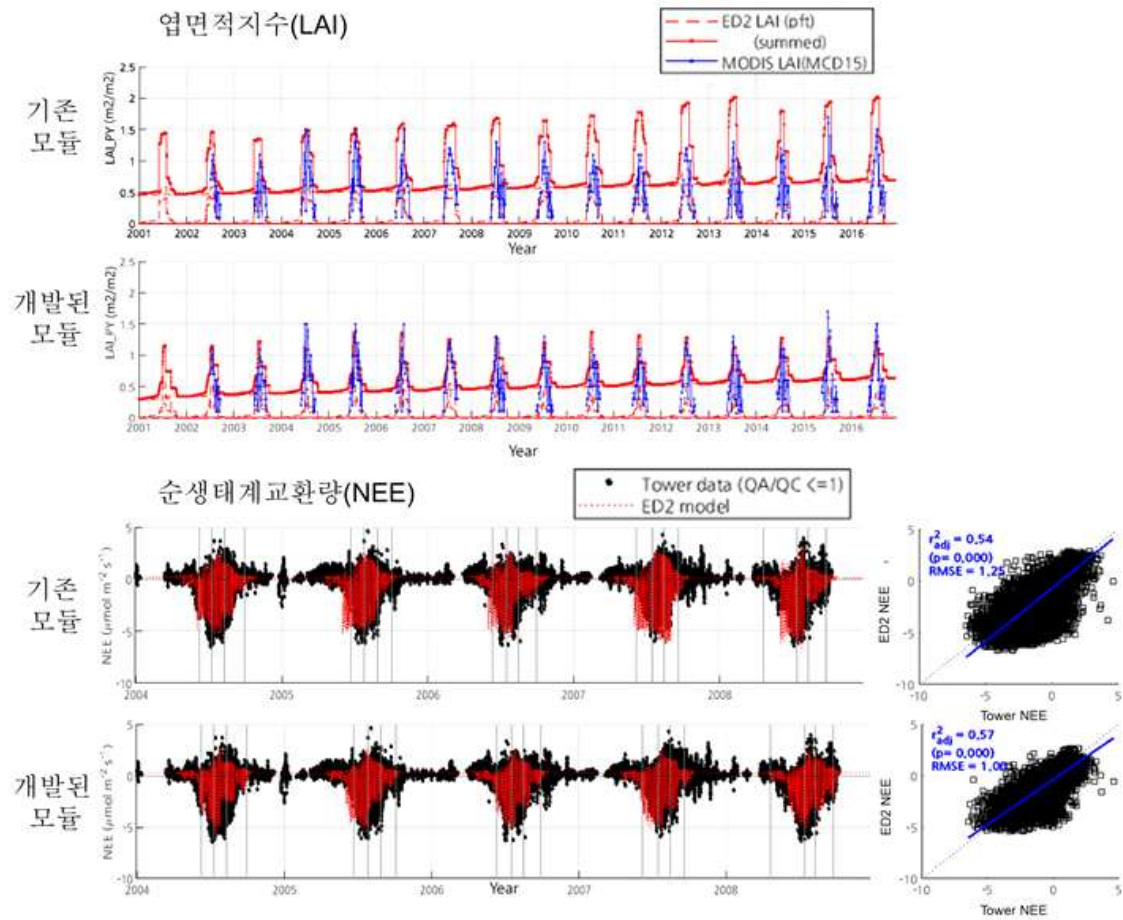
4. ED 식생계절 모듈 개선 결과

기후변화에 따른 엽면의 계절적 패턴 변화를 모의하기 위해 세 기후인자 (growing degree day, 수증기압포차, 일장(photoperiod)) 각각의 선형 함수를 승법적으로 취합한 함수(multiplicative function)로 구현한 성장기간지수(iGSI, Jolly et al., 2005)로 새로운 ED2 식생계절 모듈을 개발하였다(부록3-식생모듈 소스코드). 세 기후인자의 선형 함수의 최소·최대 한계치는 MODIS 자료 (MCD12Q2.v006)의 greenup, maturity, senescence, dormancy 타이밍에 해당하는 날(DOY)의 15년(2001-2016년) 평균치로 정하였다(그림58). 기존 ED2의 결과와 비교하여 새로운 식생계절 모듈(growing season index 기반) 엽면적지수(LAI) 모의 결과의 강도(magnitude)와 계절적 변화패턴이 원격탐사 자료(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 추산량과 더 유사해졌고(그림58), 순생태계교환량(NEE) 플럭스 모의 결과가 측정 자료 변동량의 3% 이상을 더 정확히 모의할 수 있음을 확인하였다(그림59). 특별히, 기존



<그림58> MODIS 자료(MCD12Q2.v006)의 greenup, maturity, senescence, dormancy 타이밍에 해당하는 날(DOY)의 세 기후인자(GDD, photoperiod, VPD)의 15년(2001-2016년) 평균

ED2 식생모델의 모의결과에서 개엽시기(green-up)의 NEE 플럭스는 높게 모의되고 노쇠기(senescence)의 NEE 플럭스는 측정 자료와 유사한 것을 미루어, 노쇠기에는 기후 혹은 토양 수분 부족에 의한 광합성 억제작용이 일어났음을 추정할 수 있다.



<그림59> ED2 식생계절 기존 모델과 본 연구에서 개발된 모델의
 엽면적지수(LAI)와 순생태계교환량(NEE) 모의 결과

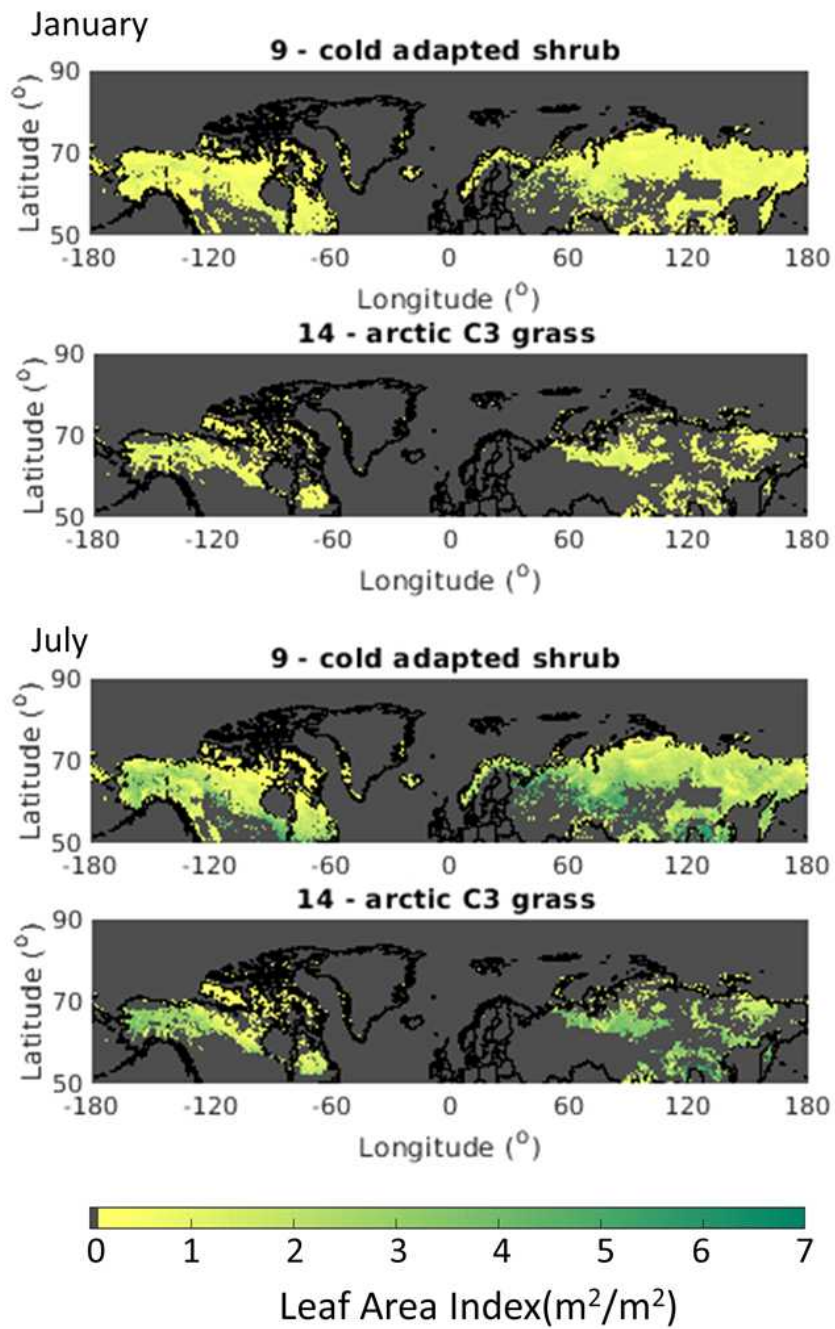
5. 알래스카 지역 ED2-툰드라 모형 구축 결과

NASA GISS에서 원격탐사데이터(MODIS 엽면적지수 데이터, 식생타입데이터, ICESat/GLAS 데이터)를 바탕으로 제작한 Ent-GVSD (Ent Global Vegetation Structure Dataset)의 식생타입별 엽면적지수(LAI) 자료에서 보면 관목(cold-adapted shrub)이 초목(arctic c3 grass)보다 더 고위도지역까지 넓은 면적에 분포해있음을 알 수 있다(그림60). Cold-adapted 관목과 극지방 C3 초목 타입 모두 1월의 LAI는 약 $1.0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 으로 지역에 따른 변화는 크게 나타나지 않았고, 7월의 LAI는 지역에 따라 높게는 약 $5.0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 까지 관측되었다(표 14). Cold-adapted shrub의 엽면적지수(LAI)와 선행 연구(낙엽관목 엽면적지수의 지상 측정 데이터)를 바탕으로 추산한 낙엽관목(deciduous shrub)의 엽면적지수(LAI)는 대체로 알래스카 전지역에서 상록관목(evergreen shrub)의 엽면적지수(LAI)보다 높게 나타났다(그림61). 상록관목(evergreen shrub)의 엽면적지수(LAI)는 알래스카 지역내에서 최대 약 $0.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 이었고(평균: $0.297 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, 표준편차: $0.019 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$), 낙엽관목(deciduous shrub)의 경우 최대 약 $4.5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ 이었다(평균: $1.908 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, 표준편차: $1.006 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$).

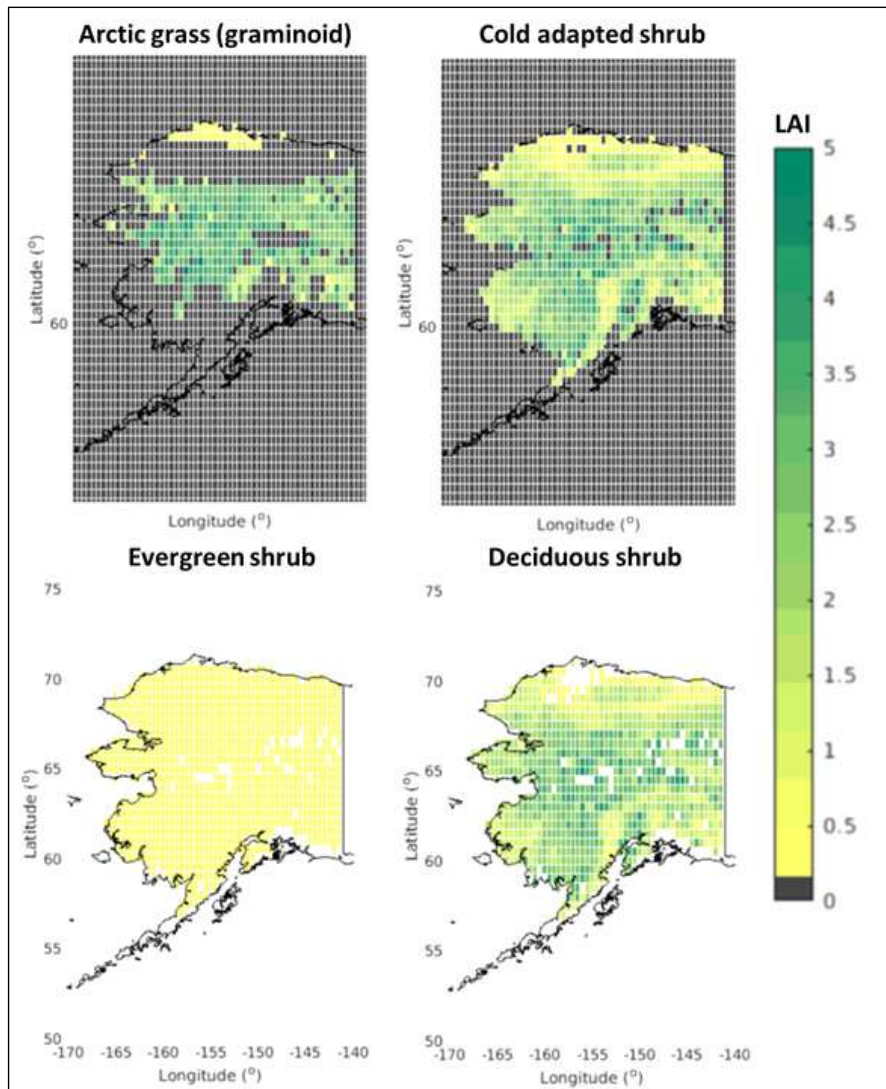
FAO에서 제공한 토양 유기탄소(SOC)와 선행 연구를 바탕으로 재구성한 토양 탄소 및 질소 집적소 추산량은 그림62(표15)과 같다. 토양 유기탄소는 알래스카 지역내에서 최대 36.30 kg C/m^2 였고(평균: 14.762 kg C/m^2 , 표준편차: 6.097 kg C/m^2), 알래스카 북부와 중부에서 가장 높게 나타났다. 이중 Structural soil C가 대부분을 차지했고(최대 35.55 kg C/m^2 , 평균: 14.458 kg C/m^2 , 표준편차:

<표14> 알래스카 지역 식생타입별 LAI 통계

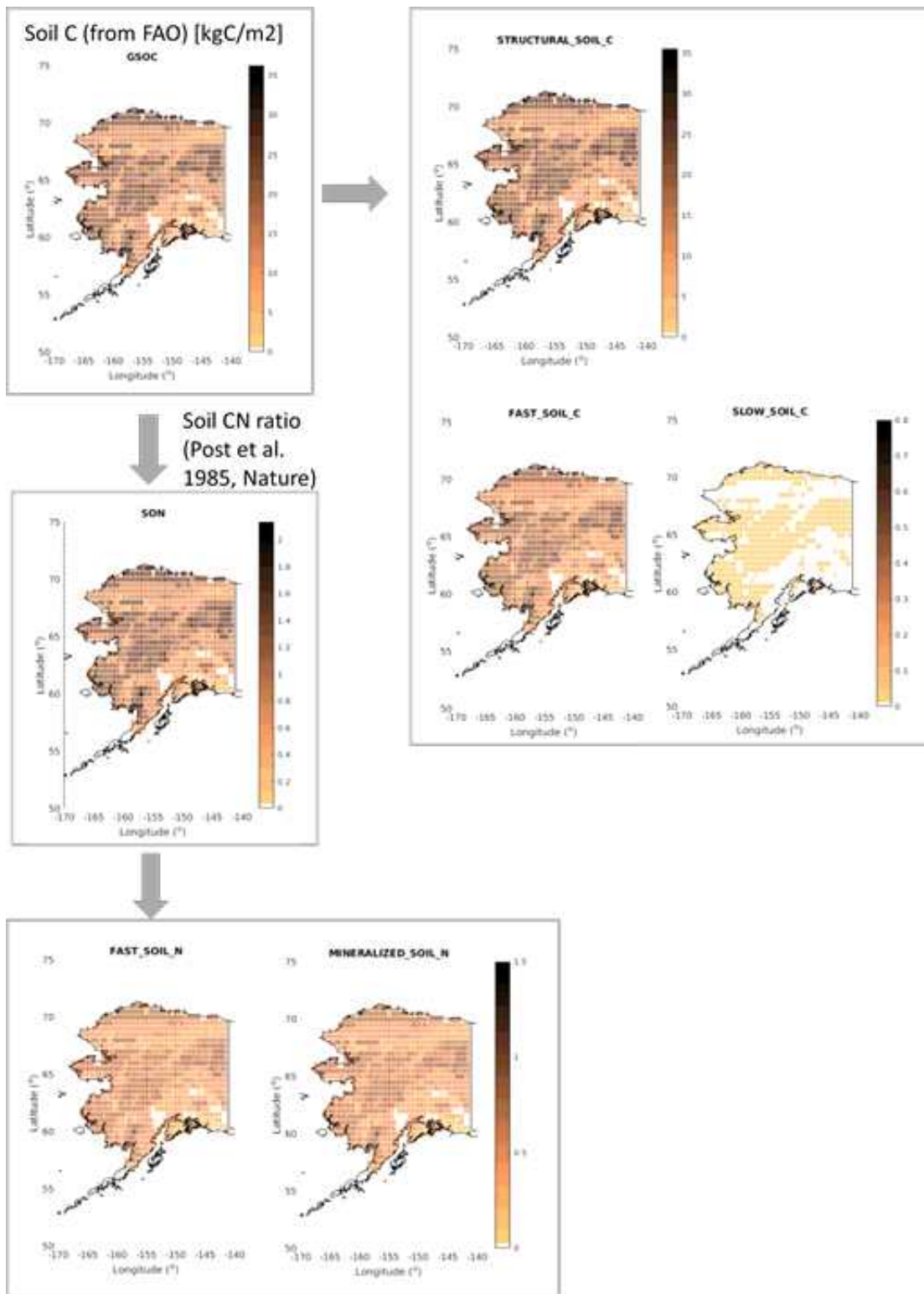
Plant Function Type (PFT)	Mean ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)	Std. Dev.
Arctic C3-grass (graminoid)	2.775	1.008
Cold-adapted shrub	2.179	1.029
Deciduous shrub	1.908	1.006
Evergreen shrub	0.297	0.019



<그림60> Ent-GVSD 자료 식생별 1월 및 7월 엽면적지수(LAI)



<그림61> 알래스카 지역 Arctic-C3 초목 및 Cold-adapted 관목 Ent-GVSD 7월 LAI(위). Cold-adapted 관목 LAI를 이용하여 추산된 낙엽관목과 상록관목의 LAI(아래)



<그림62> 알래스카 토양 탄소 및 질소 집적소(C and N pools) 추산량

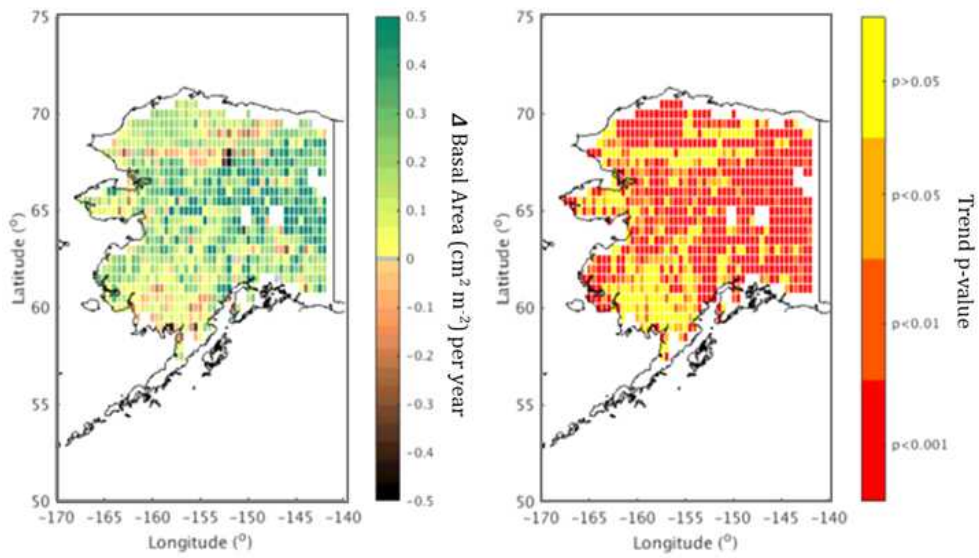
<표15> 알래스카 지역 토양 탄소 및 질소 집적소(pool) 통계

Soil Type	Mean (kg m ⁻²)	Std. Dev.
Soil Organic Carbon	14.762	6.097
Structural Soil C	14.458	5.972
Fast Soil C	0.289	0.119
Slow Soil C	0.014	0.006
Soil Organic Nitrogen	0.868	0.359
Fast Soil N	0.434	0.179
Mineralized Soil N	0.434	0.179

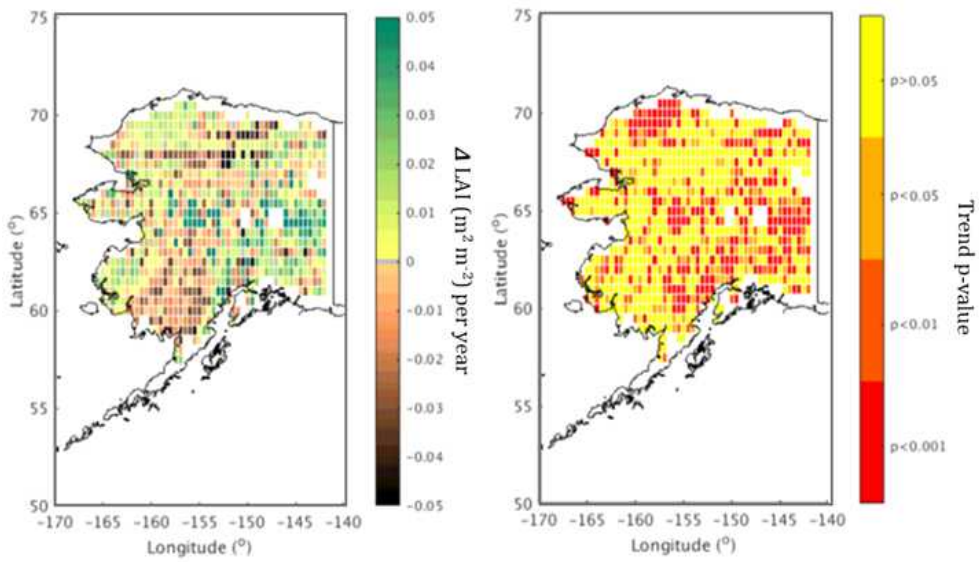
5.972 kg C/m²), Fast soil C와 Slow soil C는 각각 0.71 kg C/m²와 0.04 kg C/m²로 나타났다(평균 각각: 0.289, 0.014 kg C/m², 표준편차: 0.119, 0.006 kg C/m²). 토양 유기탄소(SON)은 알래스카 지역내에서 최대 2.13 kg N/m²로 추산되었고(평균: 0.868 kg N/m², 표준편차: 0.359 kg N/m²), mineralized soil N과 fast soil N은 각각 2.13, 1.07 kg N/m²로 추산되었다(평균: 0.434 kg N/m², 표준편차: 0.179 kg N/m²).

6. 다중 기후 조건 장기 수치실험 수행 결과

관측된 대기 및 기후조건하에서 ED2-툰드라 모형을 모의한 결과, 알래스카 거의 전 지역에서 식생 흉고단면적(Basal area)는 21년간(1995-2016년) 증가하였고($p < 0.001$), 최대 약 0.5 cm² m⁻² per year가 증가한 걸로 나타났다(그림63). 툰드라와 한림대(boreal forest)의 경계지역(위도 약 68도)과 알래스카 남부 한림대 지역에서 흉고단면적이 감소하는 패턴이 나타났으나, 그 통계적으로 유의미하지 않았다($p > 0.05$). 엽면적지수(LAI)의 증가(greening)는 일부 지역(고위도 해안과 중부 내륙)에서만 강하게 나타났고($p < 0.001$), 매해 최대 0.05 m² m⁻²가 증가하였다(그림64). 반면 중부 및 남부 지역에서는 엽면적지수가 감소하는 경향이 나타났지만(browning) 그 추세는 통계적으로 유의미하지 않았다($p > 0.05$).



<그림63> 알래스카 식생 흉고단면적(Basal area) 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p -value)

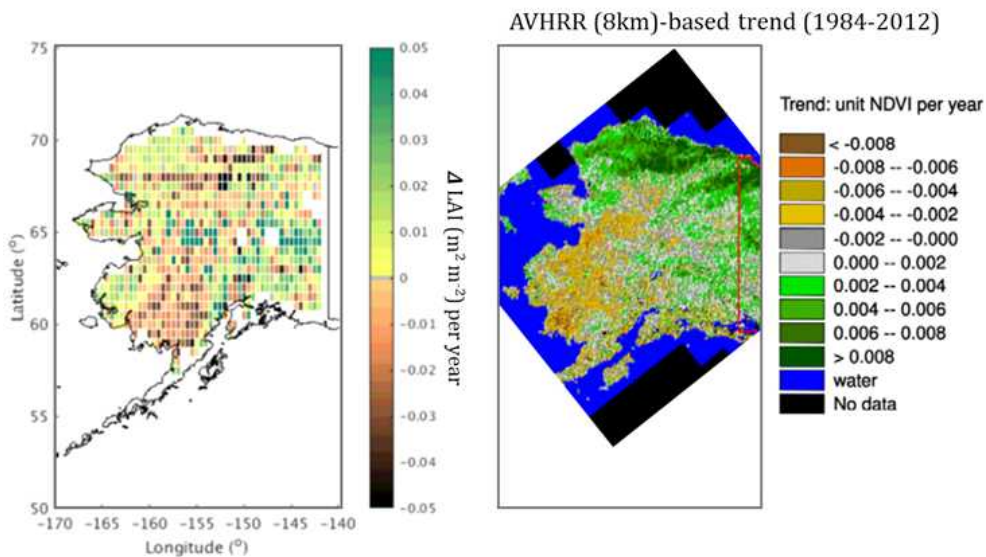


<그림64> 알래스카 식생 엽면적지수(LAI) 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p -value)

그리드내의 흉고단면적은 식생별 흉고단면적의 평균이므로, 그리드내 흉고단면적 증가는 식생별 흉고단면적의 증가(즉, 관목 성장) 혹은 식생 개체수의 증가(즉, 관목 확장)을 의미하거나 두 변화가 동시에 일어난 것을 의미한다. 따라서 그리드내 흉고단면적은 증가하였으나 엽면적지수(식생의 수직적 성장 정도)가 감소된 내륙 지역은 관목 성장보다는 관목 확장이 장기적으로 일어난 지역이라고 해석할 수 있다.

또한, ED2-tundra 모형이 모의한 알래스카 내의 엽면적지수의 이러한 증감 패턴은 원격 탐사 자료 AVHRR(8 km 공간분해능)을 이용하여 추산한 추이(1984-2012년 사이; Ju and Masek, 2016; 그림65)와 전체적으로 유사한 패턴을 보임을 확인하였다. 장기적으로 엽면적지수는 알래스카 고위도 툰드라 지역 및 내륙 동부에서 증가하였고, 남부지역에서 감소하였다는 것을 알 수 있다.

총일차생산량(GPP)의 장기변화적 증가·감소 분포는 엽면적지수(LAI)의 장기적 증가·감소 분포와 유사한 패턴을 보였다(그림66). 엽면(leaf)이 총일차생산(즉, 광합성)이 일어나는 물리적 공간이기 때문이고, 성장이 시작된 새로운 관목



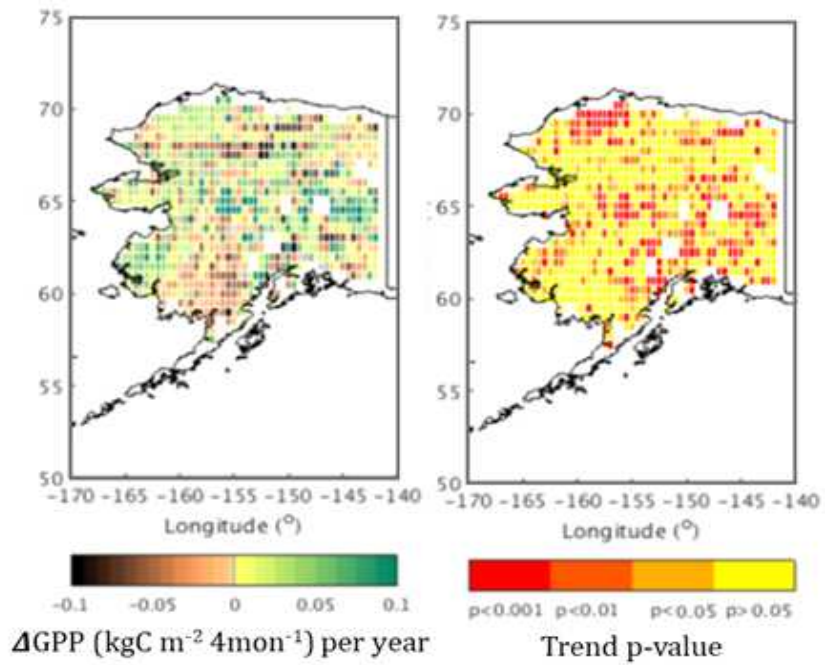
<그림65> 알래스카 식생 엽면적지수(LAI)
 (좌)ED2 모의 변화 장기변화(1995-2015년) 추이
 (우)원격탐사자료(AVHRR) 추산량 장기변화(1984-2012년) 추이

들은 기존 관목들에 비해 엽면적이 작아서(He et al., 2012), 총일차생산량이 적으므로 이러한 장기변화 패턴 분포의 유사성이 나타났다고 해석된다. 순일차생산량(NPP)의 장기변화적 증가·감소 분포는 총일차생산량(GPP)와 흡사하였으나 지역별 차이가 나타났고, 이는 생태계 호흡량(ecosystem respiration)의 차이인 것으로 해석된다(그림67).

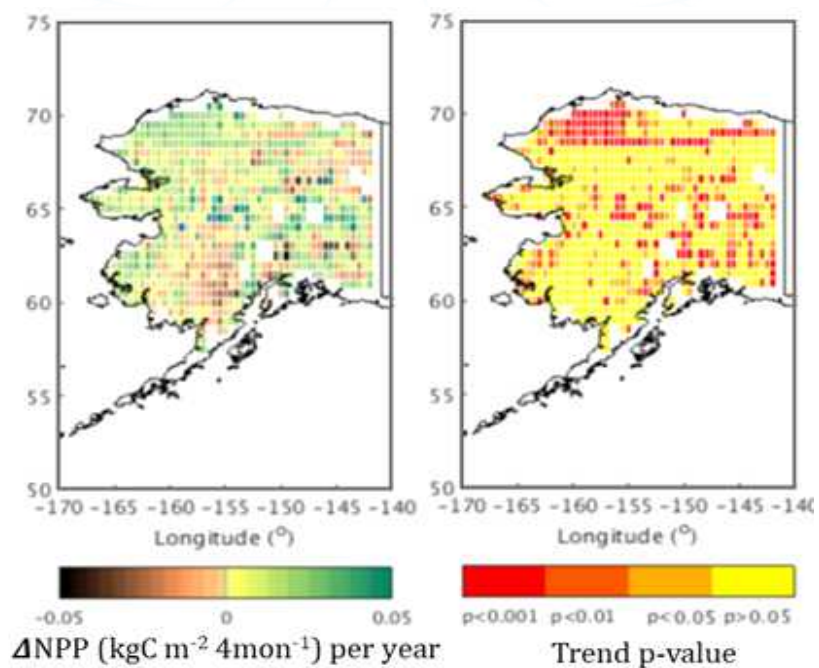
7. 기온 상승과 관목 성장 및 확장의 상대적 역할 및 피드백 고찰 결과

관목 성장 및 확장과 장기 기후변화의 영향을 분리(decoupling)하기 위해, 1995년 기온으로 모의한 결과(static-run)과 관측 대기온도로 모의한 결과(historic-run)의 차이의 장기 변화 트렌드를 분석하였다. 기온상승이 없는 조건에서도 관목 성장 및 확장의 장기변화는 알래스카 전지역에서 뚜렷이 나타났다($p < 0.001$). 이러한 고정기온(1995년의 기온) 모의 결과는 20세기 말의 기후조건이 관목 성장 및 확장에 적합한 기후였고, 최근 21년간 알래스카 지역의 기온상승은 관목 성장 및 확장을 억제하는 작용을 하였음을 의미한다(그림68). 이러한 관목 성장의 negative temperature response는 앞서 다른 연구들(site-level)에서도 발표된바 있다(Ju and Masek, 2016; Wang et al., 2018). 이러한 결과는 기온상승이 계속될 경우, 현재 발생한 관목 성장 저해가 더 가속화될 뿐 아니라, 관목 성장이 일어나는 조건의 지역도 성장 저해를 발생하는 조건으로 변할 수 있음을 의미한다.

기온상승에 의한 엽면적지수(LAI)의 장기변화는 흉고단면적과 유사하게 분포하였다(그림69). 알래스카 중부지역에 흉고단면적이 증가하였지만 엽면적지수(LAI)가 감소한 알래스카 지역은 관목의 성장보다는 확장이 우세하게 일어난 것으로 추정되지만 그 패턴이 유의미하지는 않았다($p > 0.05$). 기온상승으로 인한 순일차생산량(NPP)의 장기적 상승은 알래스카 서부에서 발생하였지만 그 패턴이 유의미하지는 않았고, 관목 확장에 의한 고위도 툰드라 지역과 남부 내륙에서의 순일차생산량(NPP)의 증가는 뚜렷하였다($p < 0.001$, 그림70). 관목 성장 및 확장에 의한 알래스카 지역 툰드라 순일차생산량(NPP)의 순변화량은 2015년 성장 기간동안(6-8월) 전체 333.01 kgC(단위면적당 평균 0.31 kgC m⁻²)으로써, 2015년 알래스카 총 NPP 플럭스의 17.32%로 추산되었다.

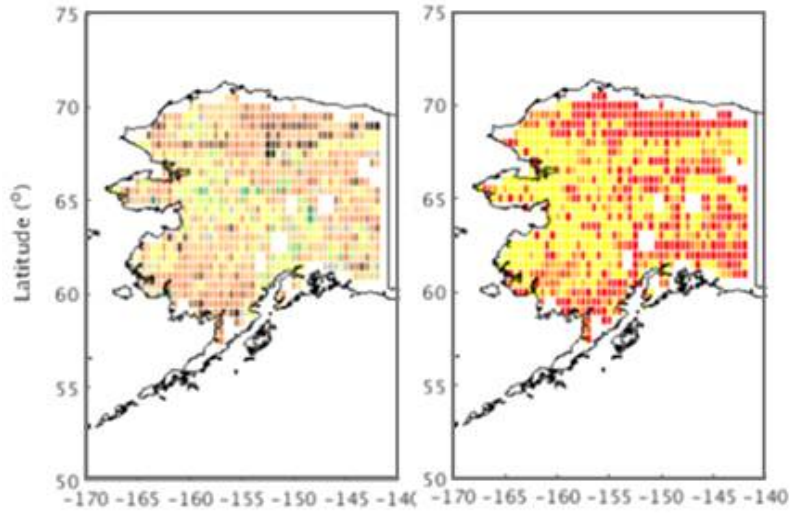


<그림66> 성장기간(growing season, 6-8월)
총일차생산량(GPP) 장기변화(1995-2015년)
추이 및 유의미성 (p -value)

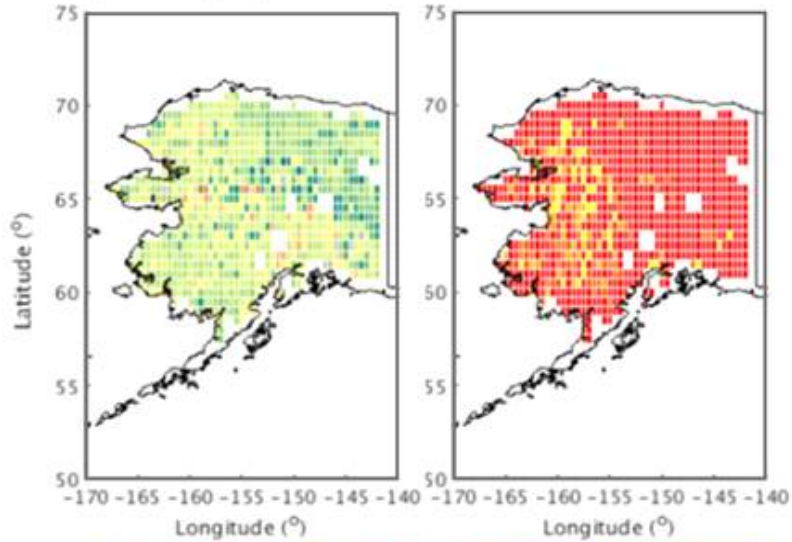


<그림67> 성장기간(growing season, 6-8월)
순일차생산량(NPP) 장기변화(1995-2015년)
추이 및 유의미성 (p -value)

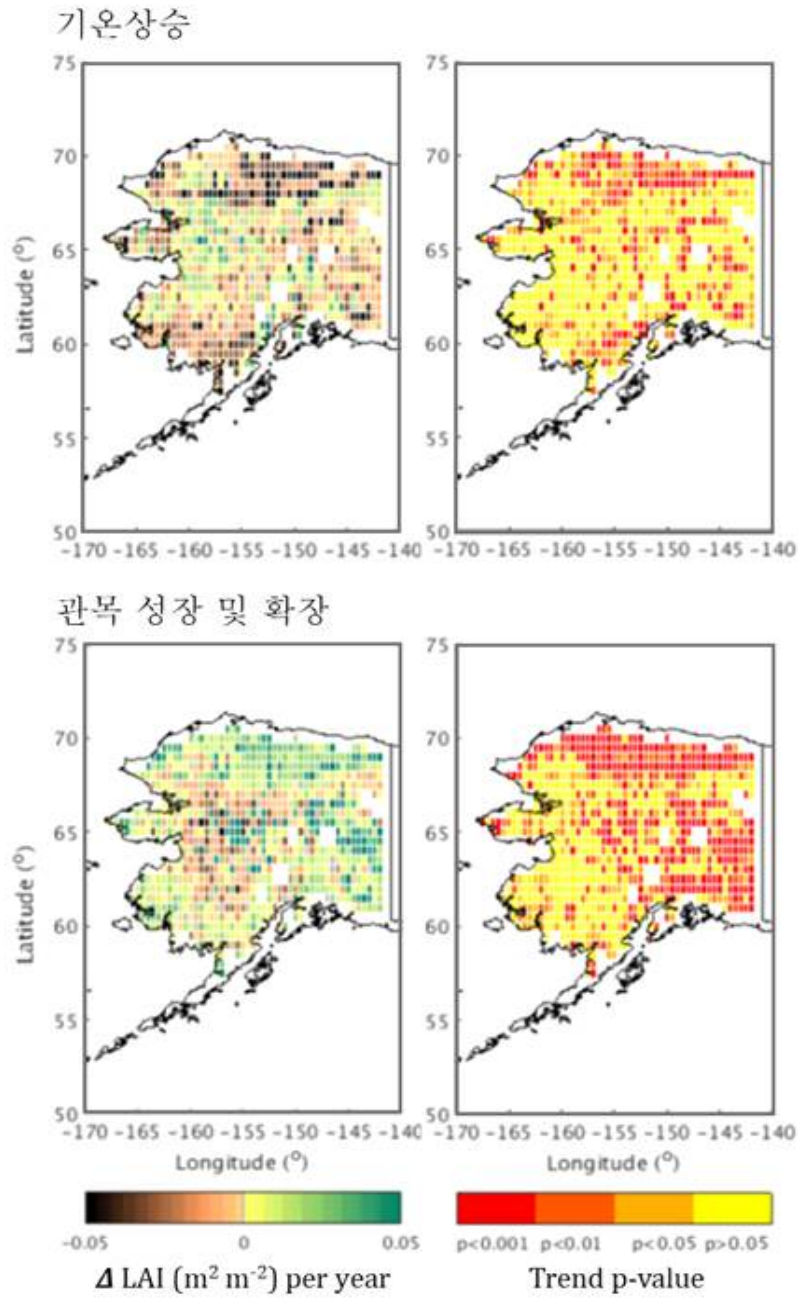
기온상승



관목 성장 및 확장

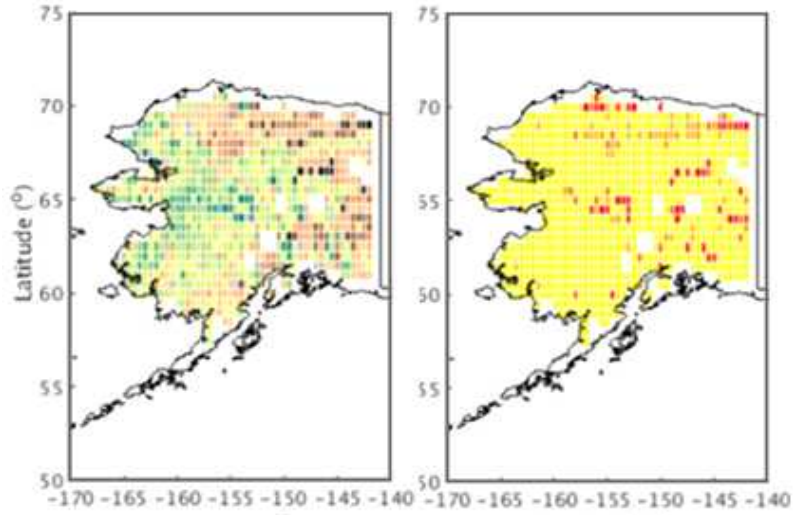


<그림68> 기온상승과 관목 확장에 의한 알래스카 식생 흉고단면적(basal area) 순변화량(net-change) 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p-value)

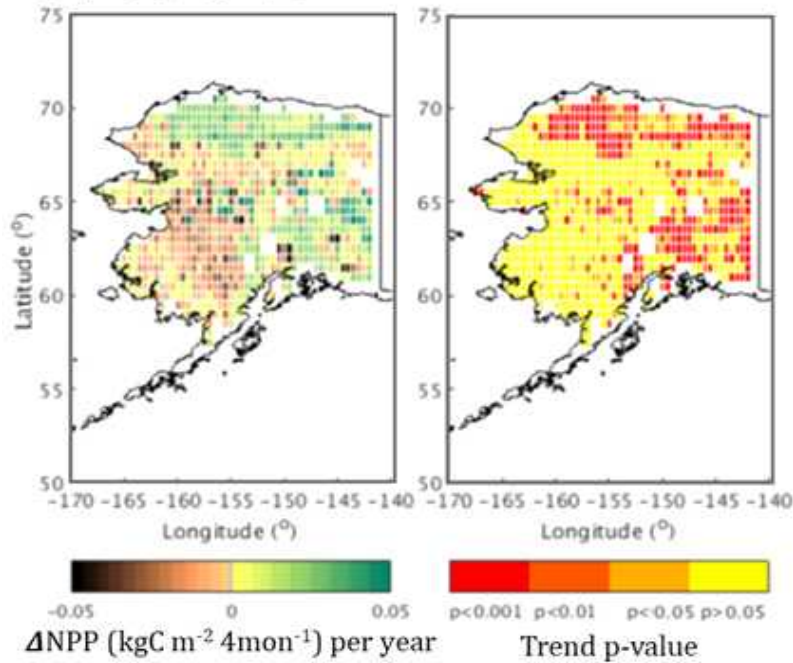


<그림69> 기온상승과 관목 확장에 의한 알래스카 식생
 엽면적지수(LAI) 순변화량(net-change)
 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p-value)

기온상승



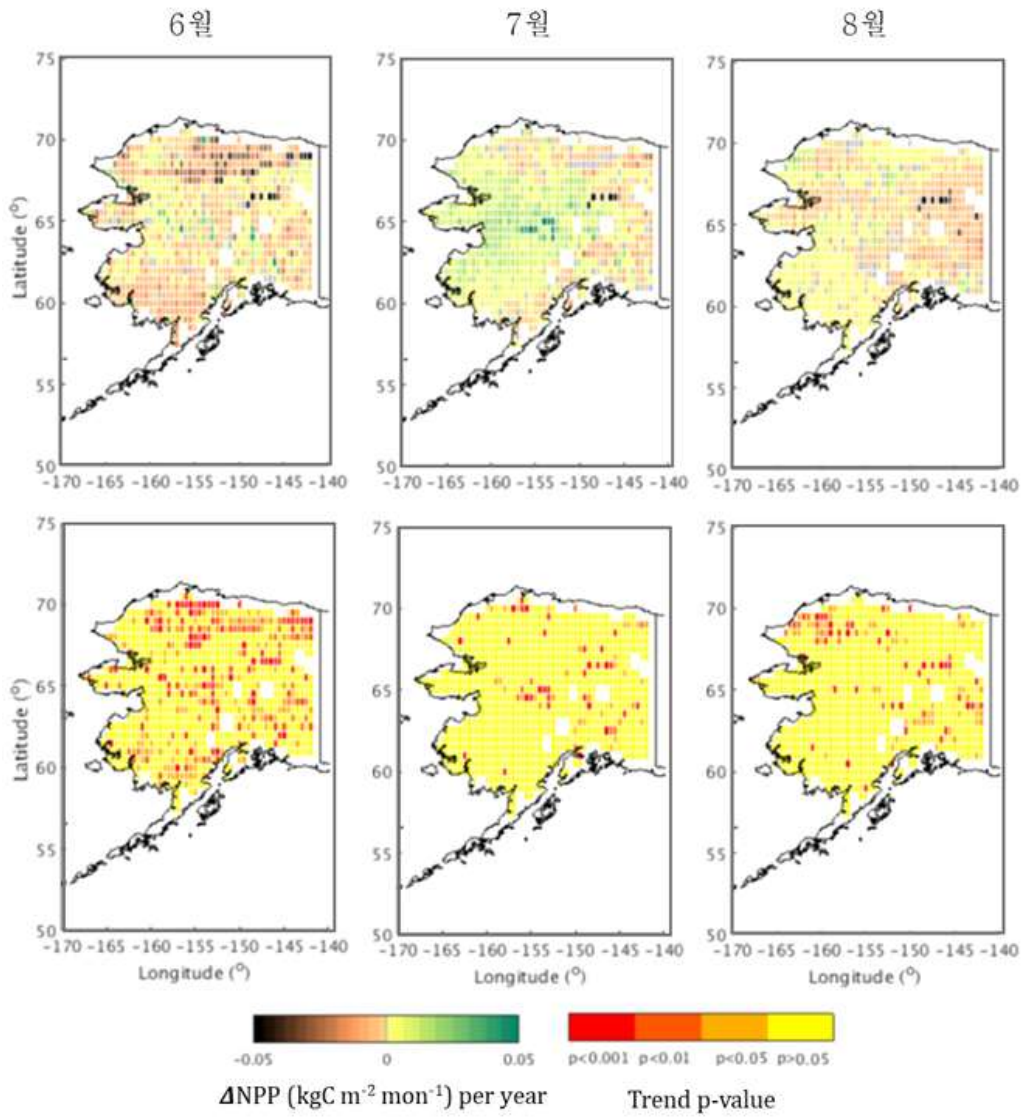
관목 성장 및 확장



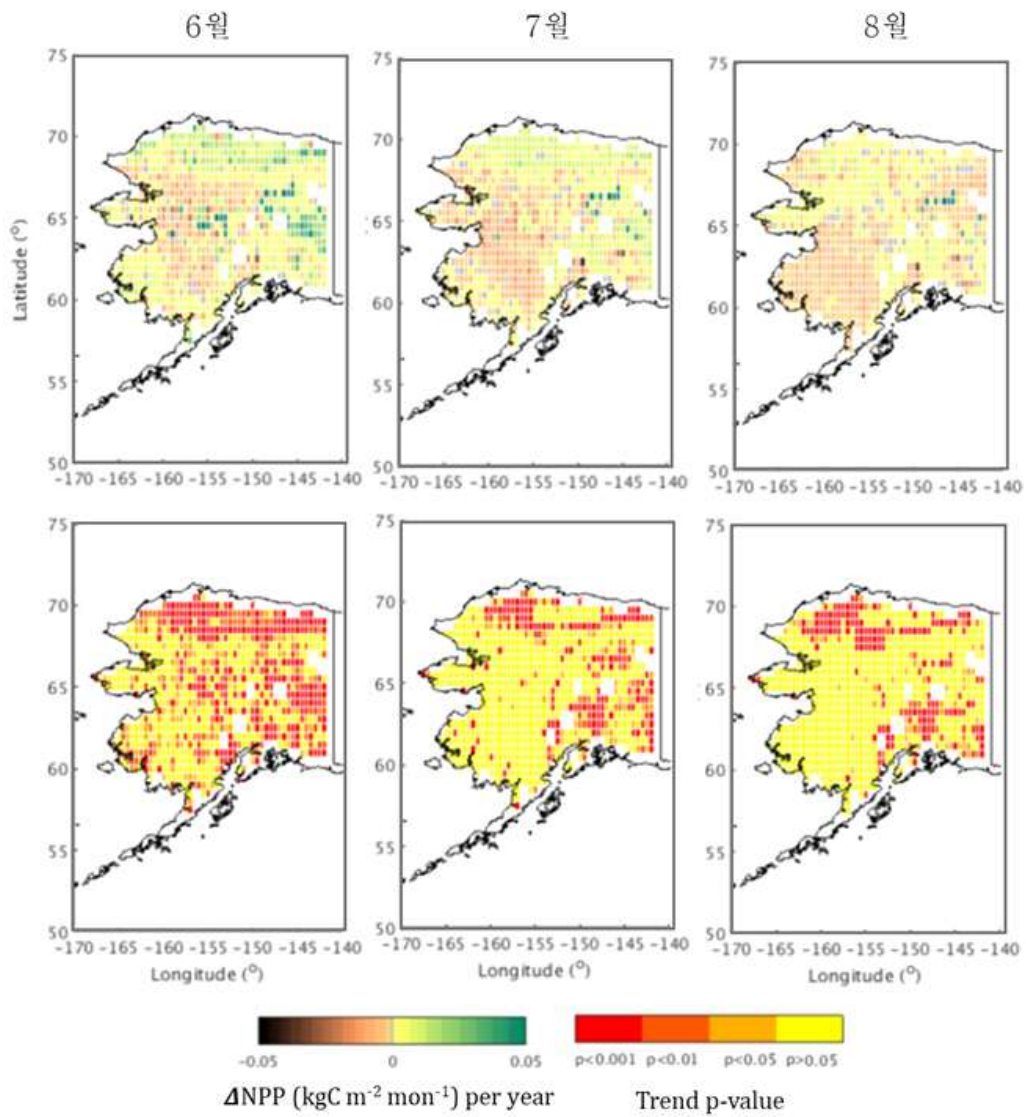
8. 관목 성장 및 확장으로 인한 생지화학 순환의 계절적 변이 고찰 결과

1995년 기온으로 모의한 결과(static-run)과 관측 대기온도로 모의한 결과(historic-run)의 차이의 장기 변화 트렌드를 분석하여 관목 성장 및 확장과 장기 기온상승의 영향을 분리(decoupling)하였다. 기온상승에 의한 순일차생산량(NPP)는 알래스카 북부 일부 지역에서 성장기간 초기(6월)에 유의미하게 장기적으로 감소하였고 ($p < 0.05$, 그림71), 낙엽 관목 (deciduous shrub)의 엽면적지수가(LAI)이 높은 알래스카 중부 지역에서 장기적으로 증가하였지만 (positive response) 그 장기변화가 유의미하지는 않았다($p > 0.05$). 알래스카 전지역에 걸쳐 성장기간 초기와 후기에 발생한 엽면적지수(LAI)의 장기적 감소는 이기간 동안의 알래스카 생태계는 기온 외의 다른 요인(예, 토양 수분)에 의해 컨트롤 된다는 것을 암시한다.

알래스카 북부 지역에서 관목 및 확장에 의한 성장기간 전체 기간동안(6-8월) 순일차생산량(NPP) 장기적 상승이 유의미하게 발생하였고($p < 0.05$, 그림72), 그 외의 지역에서 관목 확장 및 성장의 영향은 계절에 상관없이 대체로 유의미하지 않았다($p > 0.05$). 이러한 알래스카의 생지화학 순환의 계절별 장기 변화의 지역적 차이는 기후 및 수문 조건에 따른 관목 성장 및 확장의 차등적 반응(differential response)을 의미한다.



<그림71> 기온상승에 의한 알래스카 식생 순일차생산량(NPP) 순변화량(net-change) 계절별 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p-value)



<그림72> 관목 성장 및 확장에 의한 알래스카 식생 순일차생산량(NPP) 순변화량(net-change) 계절별 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p-value)

제 3 절 요약 및 결론

본 연구에서는 극지방에서 발생하고 있는 관목 성장 및 확장을 이해하고 이로 인한 알래스카 툰드라 지역의 생지화학 순환의 변이를 추산하고 고찰하기 위해 진행되었다.

주요 네 사이트(US-Atq, US-Brw, Toolik, 극지연구소)의 기상 자료를 수집하고 장기 변화(39년, 1979-2017년) 추이를 조사한 결과, 연평균 온도는 고위도에 위치한 두 사이트(US-Atq, US-Brw)가 그보다 저위도에 위치한 사이트(Toolik, 극지연구소)에 비해 낮은 반면 표준편차(39년간 연간변동)은 컸고, 39년간 연평균 온도가 통계적으로 유의미하게 상승한 것을 발견했다(매 10년간 각 사이트에서 1.75, 1.37 °C 씩 상승; $p < 0.001$). 한편, 고위도에 위치한 두 사이트(US-Atq, US-Brw)의 연강수량 평균과 표준편차(39년간 연간변동)는 그보다 저위도에 위치한 두 사이트(Toolik, 극지연구소)에 비해 적었고, 연평균 온도와는 다르게 네 사이트에서 모두 39년간 통계적으로 유의미하게 변하지 않았다($p > 0.05$).

선행 연구를 바탕으로 ED2 모형의 주요 모수 사전분포 계수를 수집하고, 이러한 사전 분포 함수를 따르는 총 1000세트의 모수 조합 세트를 QA/QC 플래그가 제공된 플릭스 자료가 이용가능한 두 사이트(US-Atq, 극지연구소)에 적용하였다. 이 결과 두 사이트의 30분 간격 순생태계교환량(NEE)과 증발산(ET) 플릭스 변동의 48.7 - 76.8%를 모의 가능함을 보였다(예외, 극지연구소 ET 플릭스 6%).

기후변화에 따른 엽면의 계절적 패턴 변화를 모의하기 위해 세 기후인자(growing degree day, 수증기압포차, 일장(photoperiod)) 각각의 선형 함수를 승법적으로 취합한 함수(multiplicative function)로 구현한 성장기간지수(iGSI)로 새로운 ED2 식생계절 모듈을 개발하여, 기존 ED2 식생계절 모듈보다 순생태계교환량(NEE) 플릭스 30분 간격 변동량의 3% 이상을 더 정확히 모의할 수 있음을 확인하였다.

이후, NASA GISS에서 원격탐사데이터(MODIS 엽면적지수 데이터, 식생타입데이터, ICESat/GLAS 데이터)를 바탕으로 제작한 Ent-GVSD (Ent Global Vegetation Structure Dataset)의 식생타입별 엽면적지수(LAI) 자료를 활용하여 상록관목(evergreen shrub)과 낙엽관목(deciduous shrub)의 엽면적지수(LAI)를 추산하고 알래스카 지역의 식생 분포와 밀도를 초기화하였다. 또한, FAO에서 제공한 토양 유기탄소(SOC)와 선행 연구를 바탕으로 재구성한 토양 탄소 및

질소 집적소(soil carbon and nitrogen pools)를 추산하여 알래스카 지역 ED2 토양 상태를 초기화하였다. ED2-툰드라 모형으로 지난 21년간(1995-2016년)의 알래스카 지역 식생의 성장을 모의한 결과, 알래스카 거의 전 지역에서 식생 흉고 단면적(Basal area)는 증가한 반면($p < 0.001$), 엽면적지수(LAI)는 일부 지역(고위도 해안과 중부 내륙)에서만 강하게($p < 0.001$) 증가한 것으로 나타났다. 이러한 엽면적지수의 증감지역 분포는 원격 탐사 자료 AVHRR(8 km 공간분해능)을 이용하여 추산한 선행연구의 결과와 유사한 패턴을 보임을 확인하였다. ED2 그리드내의 흉고단면적은 식생별 흉고단면적의 평균이므로, 그리드내 흉고단면적 증가는 식생별 흉고단면적의 증가(즉, 관목 성장) 혹은 식생 개체수의 증가(즉, 관목 확장)를 의미하거나 두 변화가 동시에 일어난 것을 의미한다. 따라서 그리드내 흉고 단면적은 증가하였으나 엽면적지수(식생의 수직적 성장 정도)가 감소된 내륙 지역은 관목 성장보다는 관목 확장이 장기적으로 일어난 지역이라고 해석할 수 있다.

관목 성장 및 확장과 장기 기후변화의 영향을 분리(decoupling)하기 위해, 1995년 기온으로 모의한 결과(static-run)과 관측 대기온도로 모의한 결과(historic-run)의 차이의 장기 변화 트렌드를 분석하였다. 기온상승이 없는 조건에서도 관목 성장 및 확장의 장기변화는 알래스카 전 지역에서 뚜렷이 나타났다($p < 0.001$). 이러한 고정기온(1995년의 기온) 모의 결과는 20세기 말의 기후조건이 관목 성장 및 확장에 적합한 기후였고, 최근 21년간 알래스카 지역의 기온상승은 관목 성장 및 확장에 영향이 없었거나, 혹은 성장 및 확장을 억제하는 작용을 하였음을 의미한다. 이러한 관목 성장의 negative temperature response는 앞서 다른 연구들(site-level)에서도 발표된바 있다. 본 연구의 결과는 기온상승이 계속될 경우, 현재 발생한 관목 성장 저해가 더 가속화될 뿐 아니라, 관목 성장이 일어나는 조건의 지역도 성장 저해를 발생하는 조건으로 변할 수 있음을 의미한다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

1. 정성적 성과 달성도

가. 2017년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
ED2-툰드라 체계 구축	○ 입력 및 검증 자료, 모형 모수 자료 구축 - 기존 관측 자료 활용 입력 및 검증 자료 구축 - 선행 연구 분석을 통한 모형 모수 자료 구축	100 %
	○ 모델링 시스템 구축 및 예비 수치실험 수행 - ED2 툰드라 생태계 모델링 시스템 구축 - 알래스카 2개 사이트 예비 수치실험 수행	100 %

나. 2018년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
ED2 모형활용 알래스카 지역 생태계 순환 모의	○ 다중 기후 조건하에 장기 수치실험 수행 - 알래스카 툰드라에 기후 조건을 달리하여 (static, historic) 장기 수치실험 수행	100 %
	○ 관목 성장과 기후 변화에 의한 생태계 순환 순 변화량 산출 및 분석 - 식생 성장 및 확장과 기후변화의 영향을 분리 하여 생지화학 순환의 장기적 계절적 변이 고찰	100 %

2. 정량적 달성도

가. 2017년도 정량적 성과

구 분		목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도		비고
국외 논문	SCI					%	
	SCIE					%	
국내 논문	SCI	1	0	0	0	%	
	SCIE					%	
특 허 출 원							
기 타							

나. 2018년도 정량적 성과

구 분		목표(건)	달성 실적(건)	주저자 실적	달성도		비고
국외 논문	SCI	2	2	2	100	%	
	SCIE					%	
국내 논문	SCI	1	0	0	0	%	작성중
	SCIE					%	
특 허 출 원							
기 타							

3. 인력양성 달성도

가. 연도별 인력양성 성과

(명)

년 도	석사(석사과정)		박사(박사과정)		계	
	목표	달성	목표	달성	목표	달성
2017	1	1			1	1
2018	1	2			1	2

나. 달성내역 및 활용실적

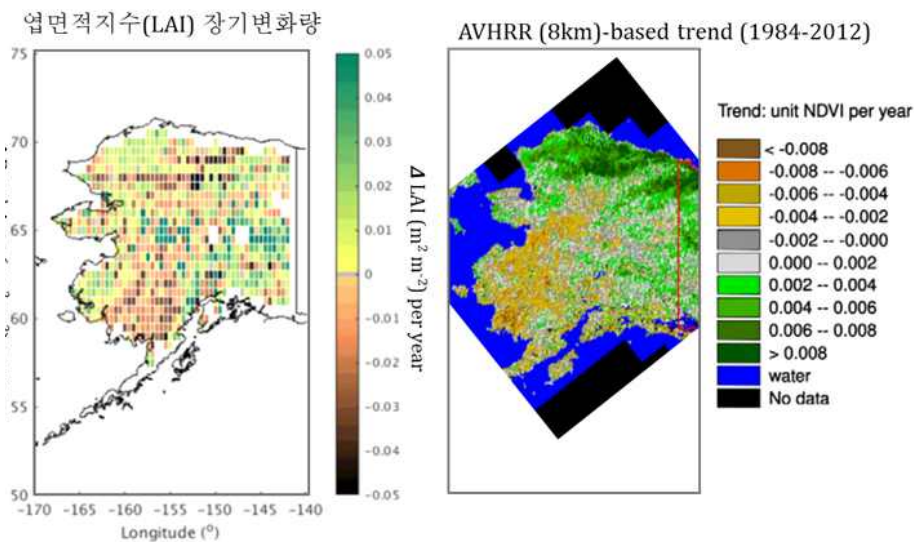
과제 참여연구원				주요 활용실적
소속	이름	전공	학위	
연세대학교	김지현	지리학	박사	① 해당 연구인력은 박사후과정/연구교수로 연구에 참여하였음 ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축과 지역모형 구동 및 결과 분석에 기여하였음
연세대학교	왕 잔	대기과학	박사	① 해당 연구인력은 박사후과정으로 연구에 참여하였음 ② 과제수행 중 ED2 지역모형 입력자료 구축에 기여하였음
연세대학교	김정빈	건설환경	석사	① 해당연구인력은 2018년 8월 석사학위 취득하였음. 석사과정 학생연구원으로 참여하였음 ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축과 지역모형 구동 및 결과 분석에 기여하였음
연세대학교	성경민	건설환경	석사	① 석사후연구원으로 과제에 참여하였음. ② 과제수행 중 ED2 지역모형 입력자료 구축에 기여하였음
연세대학교	이재형	건설환경	석사	① 해당연구인력은 2019년 2월 석사학위 취득하였음. 석사과정 학생연구원 및 석사후연구원으로 과제에 참여하였음. ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축과 지역모형 구동 및 결과 분석에 기여하였음
연세대학교	서호철	건설환경	석사	① 해당연구인력은 2019년 2월 석사학위 취득하였음. 석사과정 학생연구원 과제에 참여하였음. ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축과 구동 및 결과 분석에 기여하였음
연세대학교	조경우	건설환경	석사과정	① 해당 연구인력은 석사과정 학생연구원 연구원임 ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축과 구동 및 결과 분석에 기여하였음
연세대학교	호현주	건설환경	학사과정	① 해당 연구인력은 학부과정 학생연구원 연구원임 ② 과제수행 중 ED2 지점모형 입력자료 구축에 기여하였음

제 2 절 관련분야의 기술발전예의 대여기여도

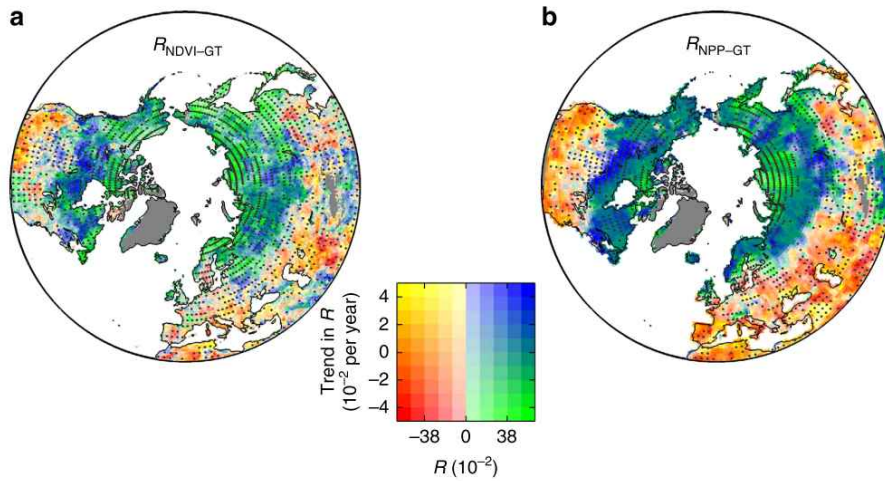
1. 연구개발 결과의 우수성

본 연구에서는 장기간(1995-2015년)의 알래스카 툰드라 지역의 관목(shrub) 및 초목(graminoid)의 성장(greening) 및 고사(browning)을 원격탐사 자료를 이용한 장기변화 추정치와 유사하게 모의할 수 있음을 보였다(그림73). 따라서 본 연구에서 알래스카 툰드라-한대림에 최적화된 ED2 모형은 최근의 연구에서 보고되고 있는 기온 상승에 대한 북반구 식생의 민감도 변화(Piao et al., 2016, 그림74)와 이로 인한 지역별 성장 및 고사 현상(Park et al., 2016, 그림75, Ju and Masek, 2016)의 원인(기후 및 수문 조건)을 분석하기 위해 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

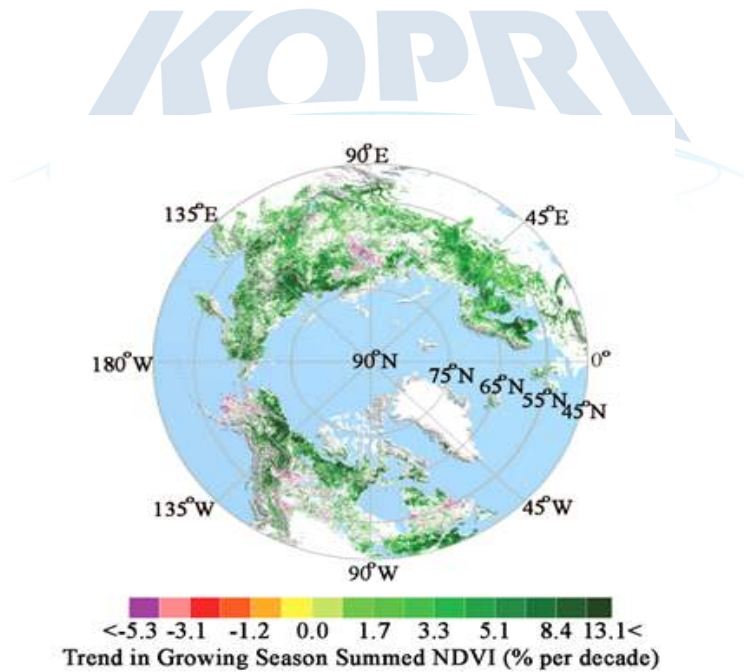
또한, 본 연구의 결과는, 관목 성장 및 생장에 의한 순일차생산량(NPP) 변화량을 분리하지 않고 분석한 선행 연구들의 기온상승에 대한 툰드라 지역 기후민감도



<그림73> 알래스카 식생 엽면적지수(LAI) 장기변화 추이
(좌)ED2 모의(1995-2015년),
(우) AVHRR(1984-2012년, Ju and Masek, 2016)



<그림74> 30년(1980-2011년) 성장기간(growing season) 정규식생지수(NDVI)와 평균온도의 상관관계(R)의 변화와 순일차생산량(NPP)와 평균온도의 상관관계(R)의 변화 (Piao et al., 2014)



<그림75> 원격탐사자료 GIMMS NDVI3g 이용 알래스카 식생 엽면적지수(LAI) 장기 변화(1982-2014년) 추이 (Park et al., 2016)

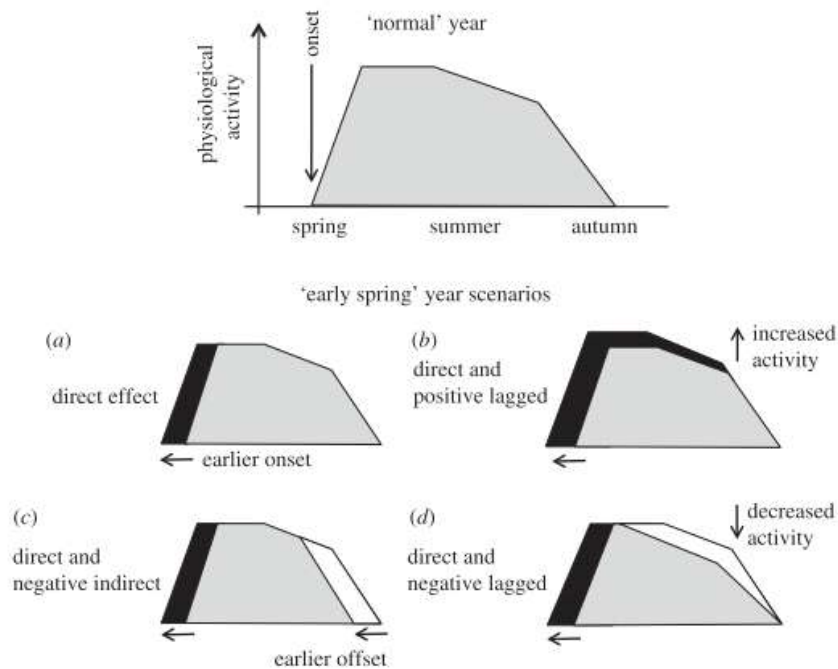
(response)가 과대평가(overestimation) 되어있었음을 시사한다. 본 연구의 결과는 미래 툰드라 생태계 변화 예측시 관목 성장 및 확장 가능의 지역별 조건을 이해하고 예측하는 것의 중요성을 시사한다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

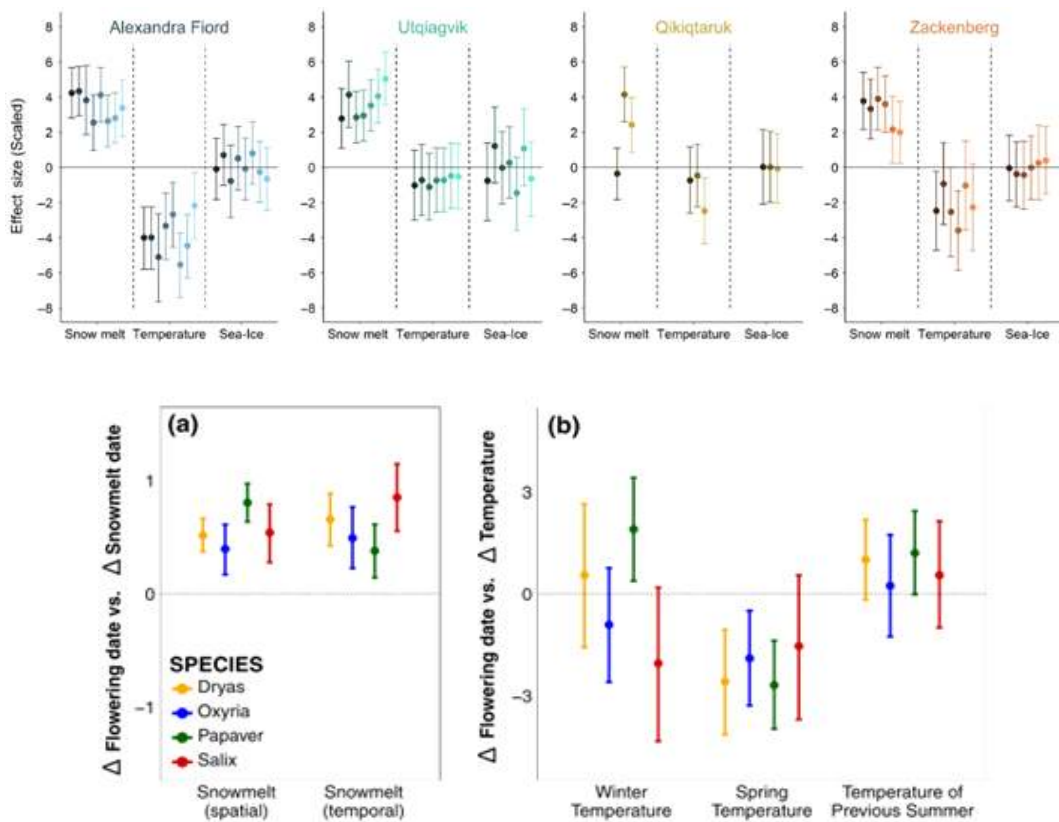
2000년 이전은 고위도 극지방 전지역에서 기온상승에 의한 생장기간이 증가(longer growing season)하고 일차생산량(GPP)이 상승하는 Greening 현상이 발생하였다(Myneni et al., 1997). 하지만 2000년 이후 툰드라 지역은 계속해서 Greening하는 반면, 한대림(boreal forest)에서는 생장기간이 감소(혹은 증가율이 감소)하고 일차생산량이 감소(혹은 증가율이 감소)하는 Browning 현상이 보고되었다(Piao et al., 2014, Park et al., 2016, Ju and Masek 2016). 식생계절(생장기간 시작과 끝)의 변화는 생장 기간의 증감 뿐만이 아니라, 식생의 성장에도 영향을 미치는 중요한 식생 생리현상이다(Richardson et al., 2010). 예를 들어, 빨라진 생장 시작(earlier spring onset)에 의해 성장량이 증가(positive feedback)할



<그림76> 개엽시기(spring onset)의 변화에 따른 식생 성장의 가능한 변화 도식도(Richardson et al., 2010)

수도 있고, 혹은 다른 식생 성장 조건을 변화(예, 토양수분의 이른 고갈)시켜 성장량을 감소(negative feedback)시킬 수 있다(그림76). 따라서 최근의 툰드라와 한대림 지역의 식생계절의 다변화(diverse pattern)에 의해 앞으로 극지방 지표면과 대기와의 탄소순환 시기와 플럭스가 복잡하게 변화할 것으로 예상되므로, 극지방 기온상승과 식생계절 변화로 인한 탄소순환 변화 및 관련 피드백에 대한 과학적 이해 및 예측에 대한 후속연구가 요구된다.

본 연구에서 개발된 식생계절 및 선행 연구들에서 개발된 식생계절은 기온(혹은 토양온도), 일조량, 토양수분(혹은 대기 건조도)등의 기후 인자를 주요 변수로 하는 모형들이 대표적이다. 최근, 지상 관측 연구에서 극지방에서의 개엽시기(greenup timing)에 적설용해시기(snowmelting timing)가 기온만큼의 중요인자라는 결과가 보고된 바 있다(Bjorkman et al., 2015, Assmann et al., 2019, 그림77). 따라서,



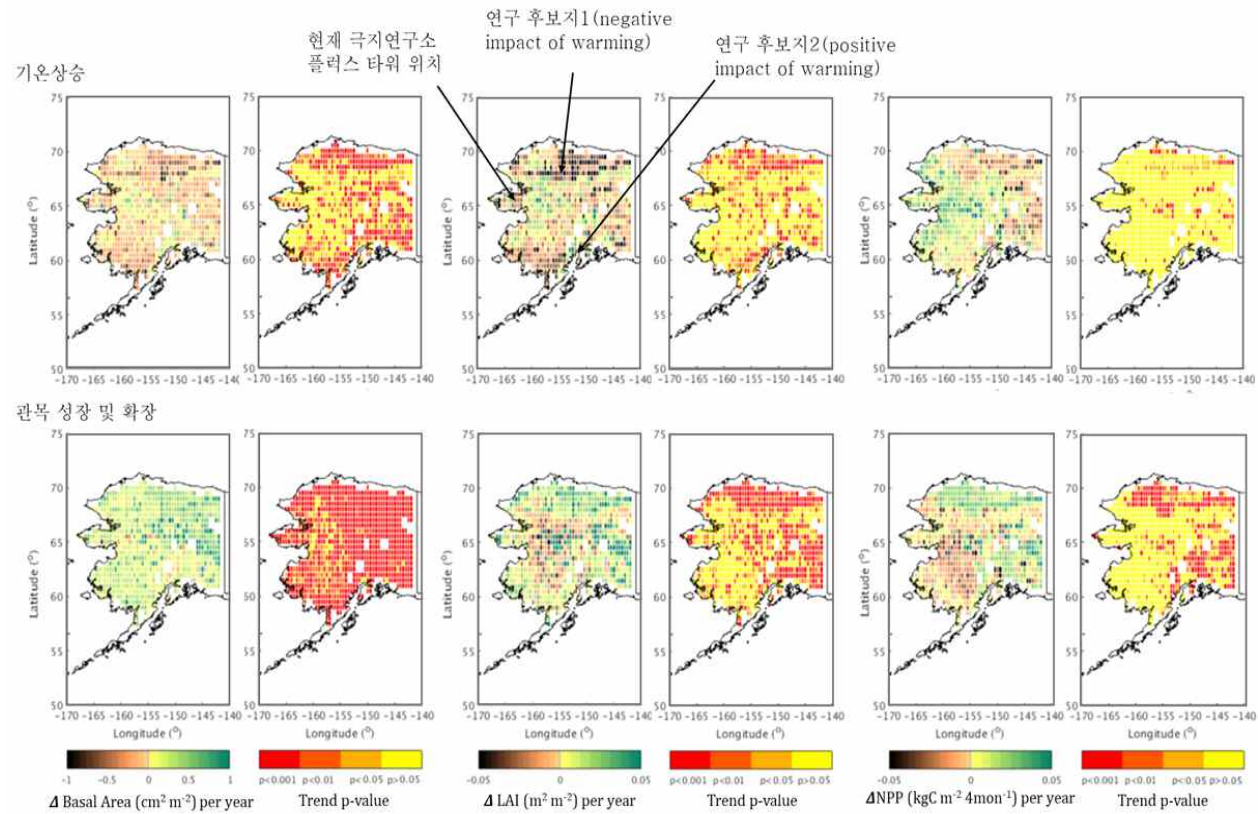
<그림77> 개엽시기(greenup date 혹은 flowering date) 변동에 대한 적설용해시기와 그 외 요소(봄철 온도, 겨울철 온도)의 중요성(위: Assmann et al., 2019; 아래: Bjorkman et al., 2015)

원격탐사자료 및 현장관측 자료를 이용하여 극지역 전체에서 적설용해시기와 개엽 시기의 상관관계를 분석하고 이를 포함한 식생계절 모형의 개발이 요구된다.

제 2 절 활용방안 및 기대효과

본 연구에서 구축한 개별기반 지역생태모형인 생태계인구모형(ED2)은 지역 기후모형 접합(Coupling to atmospheric model)되어 있는 모형으로 향후 생태계-지역 기후 상호작용 등에 대한 연구 가능성 매우 크다. 뿐만 아니라, 향후 기후 변화에 따른 극지 생태계 반응을 예측하기 위한 관측-모형 연구 상호 보완을 위한 모형 플랫폼을 제공한다. 따라서 향후 다산기지 및 여러 관측 자료 활용, 모형 적용 및 확대를 위한 기반을 제공하고, 본 연구에서 다루지 않는 다양한 생지화학 관련 연구로의 확대가 가능하다. 모형 결과 활용 기후변화 민감 지역이나 도출 등 모형 연구결과를 활용하여 관측 지역 선정, 관측 실험 디자인 등에 기여할 수 있다. 예를 들어, 현재 극지연구소의 플렉스 타워가 설치되어 있는 Council 지역은 기온 상승에 대한 negative effect(즉 흉고단면적과 엽면적지수의 감소)가 발생하고 있는 지역이지만 그 장기변화가 유의미하지 않다($p > 0.05$, 그림78). 따라서, 본 연구의 결과에서 장기 변화가 유의미하고, 그 방향이 반대인(positive effect와 negative effect) 지역을 선별하여(연구 후보지 1,2, 그림78) 플렉스 타워를 설치하고 현장 관측 (타워 풋프린터내 식생의 흉고단면적 및 엽면적 실측, 토양 수분 및 온도 측정 등)을 실시한다면, 현재 극지방 생태계에서의 식생 구성 변화 및 생지화학 순환 변화의 이해를 위해 활용될 수 있을 것이다.

우리나라 극지 모델링 기반 지면생태계 연구는 전지구 기반 지면생태계 모형을 기반 기후-탄소 상호작용 측면의 연구가 대다수이고, 대부분 기존의 기후-지면생태 접합모형을 활용한 연구가 주류를 이루어왔다. 본 연구는 개별기반 생태모형을 구축하고 활용하는 선제적 연구로 우리나라 극지방 지면생태 모델링 기술 발전에 기여할 것으로 기대한다. 또한, 극지 지면생태 및 수문 관련 전문인력 양성하여 극지연구소 등 향후 인재 채용 풀 확대에 기여할 것으로 기대한다.



<그림 78> 기온상승과 관목 확장 각각에 의한 알래스카 식생 흉고단면적(Basal area), 엽면적지수(LAI), 순일차생산량(NPP) 순변화량(net-change)의 장기변화(1995-2015년) 추이 및 유의미성(p -value)과 연구 후보지

제 6 장 참고문헌

- Assmann, J. J., Smith, I. H. M., Phillimore, A. B., Bjorkman, A. D., Ennos, R. E., Prevy, J. S., et al. (2019). Local snow melt and temperature—but not regional sea ice—explain variation in spring phenology in coastal Arctic tundra. *Global Change Biology*, *0*(0), 1-17. [https://https://doi.org/10.1111/gcb.14639](https://doi.org/10.1111/gcb.14639)
- Barling, R. D., Moore, I. D., & Grayson, R. B. (1994). A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content. *Water Resources Research*, *30*(4), 1029-1044. <https://doi.org/10.1029/93WR03346>
- Bjorkman, A. D., Elmendorf, S. C., Beamish, A. L., Vellend, M., & Henry, G. H. R. (2015). Contrasting effects of warming and increased snowfall on Arctic tundra plant phenology over the past two decades. *Global Change Biology*, *21*(12), 4651-4661. <https://doi.org/10.1111/gcb.13051>
- Davidson, C. D. (2012). *The modeled effects of fire on carbon balance and vegetation abundance in alaska tundra*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Engstrom, R., Hope, A., Kwon, H. J., Harazono, Y., Mano, M., & Oechel, W. (2006). Modeling evapotranspiration in Arctic coastal plain ecosystems using a modified BIOME-BGC model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *111*(G2), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2005JG000102>
- Goodrich, J. P., Oechel, W. C., Gioli, B., Moreaux, V., Murphy, P. C., Burba, G., & Zona, D. (2016). Impact of different eddy covariance sensors, site set-up, and maintenance on the annual balance of CO₂ and CH₄ in the harsh Arctic environment. *Agricultural and Forest Meteorology*,

228-229, 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.008>

Grant, R. F., Mekonnen, Z. A., Riley, W. J., Arora, B., & Torn, M. S. (2019). Modeling Climate Change Impacts on an Arctic Polygonal Tundra: 2. Changes in CO₂ and CH₄ Exchange Depend on Rates of Permafrost Thaw as Affected by Changes in Vegetation and Drainage. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(5), 1323-1341. <https://doi.org/10.1029/2018JG004645>

HARAZONO, Y., MANO, M., MIYATA, A., ZULUETA, R. C., & OECHEL, W. C. (2003). Inter-annual carbon dioxide uptake of a wet sedge tundra ecosystem in the Arctic. *Tellus B*, 55(2), 215-231. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2003.00012.x>

He, L., Chen, J., Pan, Y., Birdsey, R., & Kattge, J. (2012). *Relationships between net primary productivity and forest stand age in U.S. forests. Global Biogeochemical Cycles* (Vol. 26). <https://doi.org/10.1029/2010GB003942>

IPCC, 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 [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.

Jolly, W. M., Nemani, R., & Running, S. W. (2005). A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate. *Global Change Biology*, 11(4), 619-632. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00930.x>

Ju, J., & Masek, J. G. (2016). The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984-2012 Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 176, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.001>

- Juutinen, S., Virtanen, T., Kondratyev, V., Laurila, T., Linkosalmi, M., Mikola, J., et al. (2017). Spatial variation and seasonal dynamics of leaf-area index in the arctic tundra—implications for linking ground observations and satellite images. *Environmental Research Letters*, *12*(9), 095002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7f85>
- Kim, Y., Knox, R. G., Longo, M., Medvigy, D., Hutyra, L. R., Pyle, E. H., et al. (2012). Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an Amazon rainforest. *Global Change Biology*, *18*(4), 1322-1334. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02629.x>
- van der Kolk, H.-J., Heijmans, M. M. P. D., van Huissteden, J., Pullens, J. W. M., & Berendse, F. (2016). Potential Arctic tundra vegetation shifts in response to changing temperature, precipitation and permafrost thaw. *Biogeosciences*, *13*(22), 6229-6245. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6229-2016>
- Koven, C. D., Hugelius, G., Lawrence, D. M., & Wieder, W. R. (2017). Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nature Climate Change*, *7*, 817. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/nclimate3421>
- Kwon, H. J., Oechel, W. C., Zulueta, R. C., & Hastings, S. J. (2006). Effects of climate variability on carbon sequestration among adjacent wet sedge tundra and moist tussock tundra ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *111*(3), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2005JG000036>
- Lawrence, D. M., & Swenson, S. C. (2011). Permafrost response to increasing Arctic shrub abundance depends on the relative influence of shrubs on local soil cooling versus large-scale climate warming. *Environmental Research Letters*, *6*(4), 045504.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045504>

- Martin, A. C., Jeffers, E. S., Petrokofsky, G., Myers-Smith, I., & Macias-Fauria, M. (2017). Shrub growth and expansion in the Arctic tundra: an assessment of controlling factors using an evidence-based approach. *Environmental Research Letters*, *12*(8), 085007.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7989>
- Medvigy, D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Hollinger, D. Y., & Moorcroft, P. R. (2009). Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: Ecosystem Demography model version 2. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *114*(G1), G01002.
<https://doi.org/10.1029/2008JG000812>
- Myers-Smith, I. H., Hik, D. S., Kennedy, C., Cooley, D., Johnstone, J. F., Kenney, A. J., & Krebs, C. J. (2011). Expansion of Canopy-Forming Willows Over the Twentieth Century on Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *AMBIO*, *40*(6), 610.
<https://doi.org/10.1007/s13280-011-0168-y>
- Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilkening, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., et al. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, *6*(4), 045509. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045509>
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., & Nemani, R. R. (1997). Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, *386*(6626), 698-702.
<https://doi.org/10.1038/386698a0>
- Naito, A. T., & Cairns, D. M. (2011). Relationships between Arctic shrub dynamics and topographically derived hydrologic characteristics. *Environmental Research Letters*, *6*(4), 045506.

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045506>

NOAA Arctic Report Card: Update for 2018,

<https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2018>

Park, T., Ganguly, S., Thommervik, H., Euskirchen, E. S., Høgdal, K.-A., Karlsen, S. R., et al. (2016). Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 11(8), 084001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084001>

Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luysaert, S., et al. (2008). Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451(7174), 49-52.
<https://doi.org/10.1038/nature06444>

Piao, S., Nan, H., Huntingford, C., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S., et al. (2014). Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. *Nature Communications*, 5, 5018. <https://doi.org/10.1038/ncomms6018>

Post, W. M., Pastor, J., Zinke, P. J., & Stangenberger, A. G. (1985). Global patterns of soil nitrogen storage. *Nature*, 317, 613.
<https://doi.org/10.0.4.14/317613a0>

Richardson, A. D., Black, T., Ciais, P., Delbart, N., Friedl, M. A., Gobron, N., et al. (2010). Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1555), 3227-3246.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0102>

Schödel, C., Koven, C. D., Lawrence, D. M., Celis, G., Garnello, A. J., Hutchings, J., et al. (2018). Divergent patterns of experimental and

model-derived permafrost ecosystem carbon dynamics in response to Arctic warming. *Environmental Research Letters*, 13(10), 105002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae0ff>

Sturm, M., Racine, C., & Tape, K. (2001). Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature*, 411(6837), 546-547. <https://doi.org/10.1038/35079180>

TAPE, K., STURM, M., & RACINE, C. (2006). The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*, 12(4), 686-702. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01128.x>

Trugman, A. T., Fenton, N. J., Bergeron, Y., Xu, X., Welp, L. R., & Medvigy, D. (2016). Climate, soil organic layer, and nitrogen jointly drive forest development after fire in the North American boreal zone. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8(3), 1180-1209. <https://doi.org/10.1002/2015MS000576>

Wang, T., Liu, D., Piao, S., Wang, Y., Wang, X., Guo, H., et al. (2018). Emerging negative impact of warming on summer carbon uptake in northern ecosystems. *Nature Communications*, 9(1), 5391. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07813-7>

Xu, X., Medvigy, D., Powers, J. S., Becknell, J. M., & Guan, K. (2016). Diversity in plant hydraulic traits explains seasonal and inter-annual variations of vegetation dynamics in seasonally dry tropical forests. *New Phytologist*, 212(1), 80-95. <https://doi.org/10.1111/nph.14009>

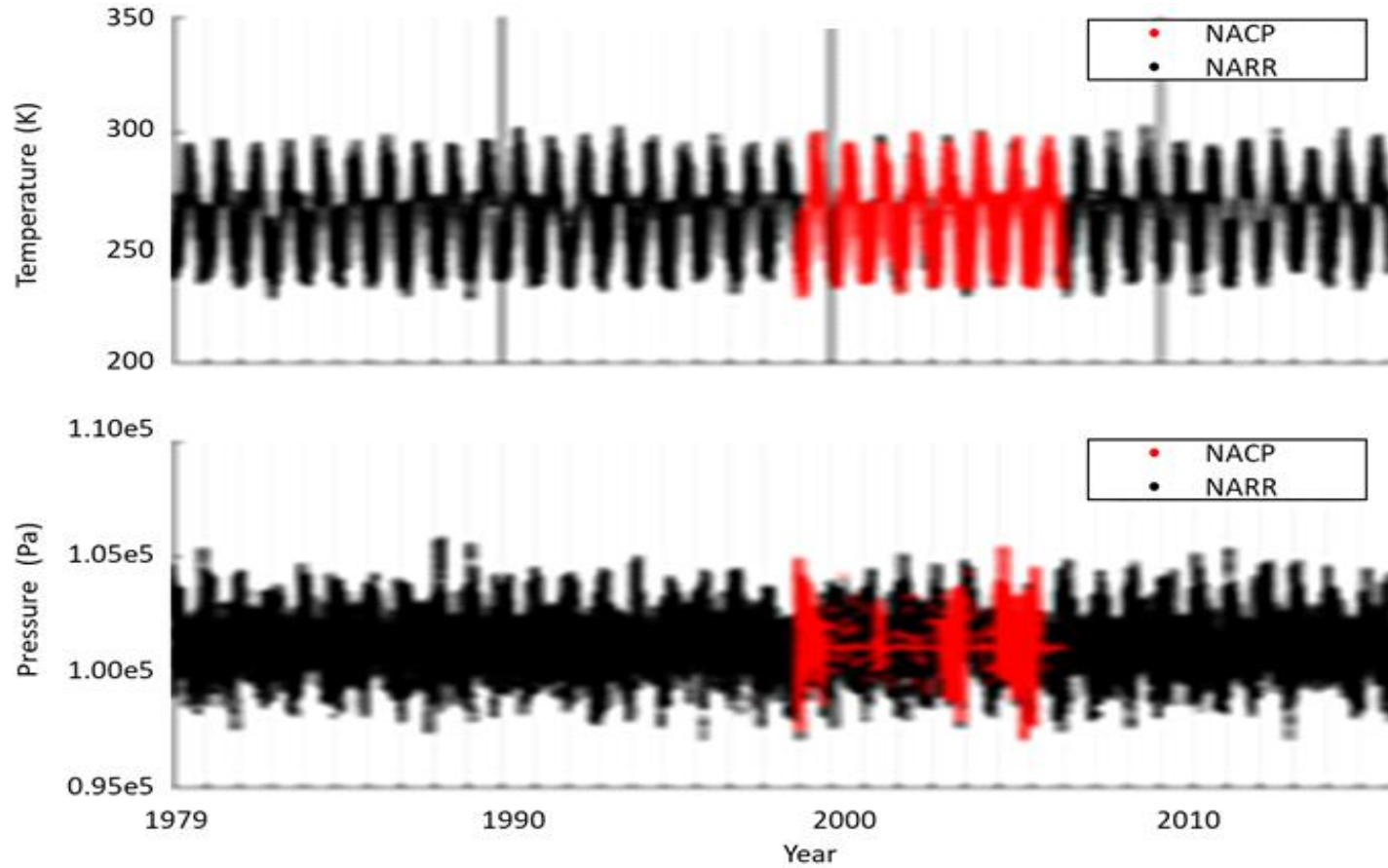
Yi, Y., Kimball, J. S., Chen, R. H., Moghaddam, M., Reichle, R. H., Mishra, U., et al. (2018). Characterizing permafrost active layer dynamics and sensitivity to landscape spatial heterogeneity in Alaska. *The Cryosphere*, 12(1), 145-161. <https://doi.org/10.5194/tc-12-145-2018>

Zona, D., Oechel, W. C., Kochendorfer, J., Paw U, K. T., Salyuk, A. N., Olivas, P. C., et al. (2009). Methane fluxes during the initiation of a large-scale water table manipulation experiment in the Alaskan Arctic tundra. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2), 1-11.
<https://doi.org/10.1029/2009GB003487>

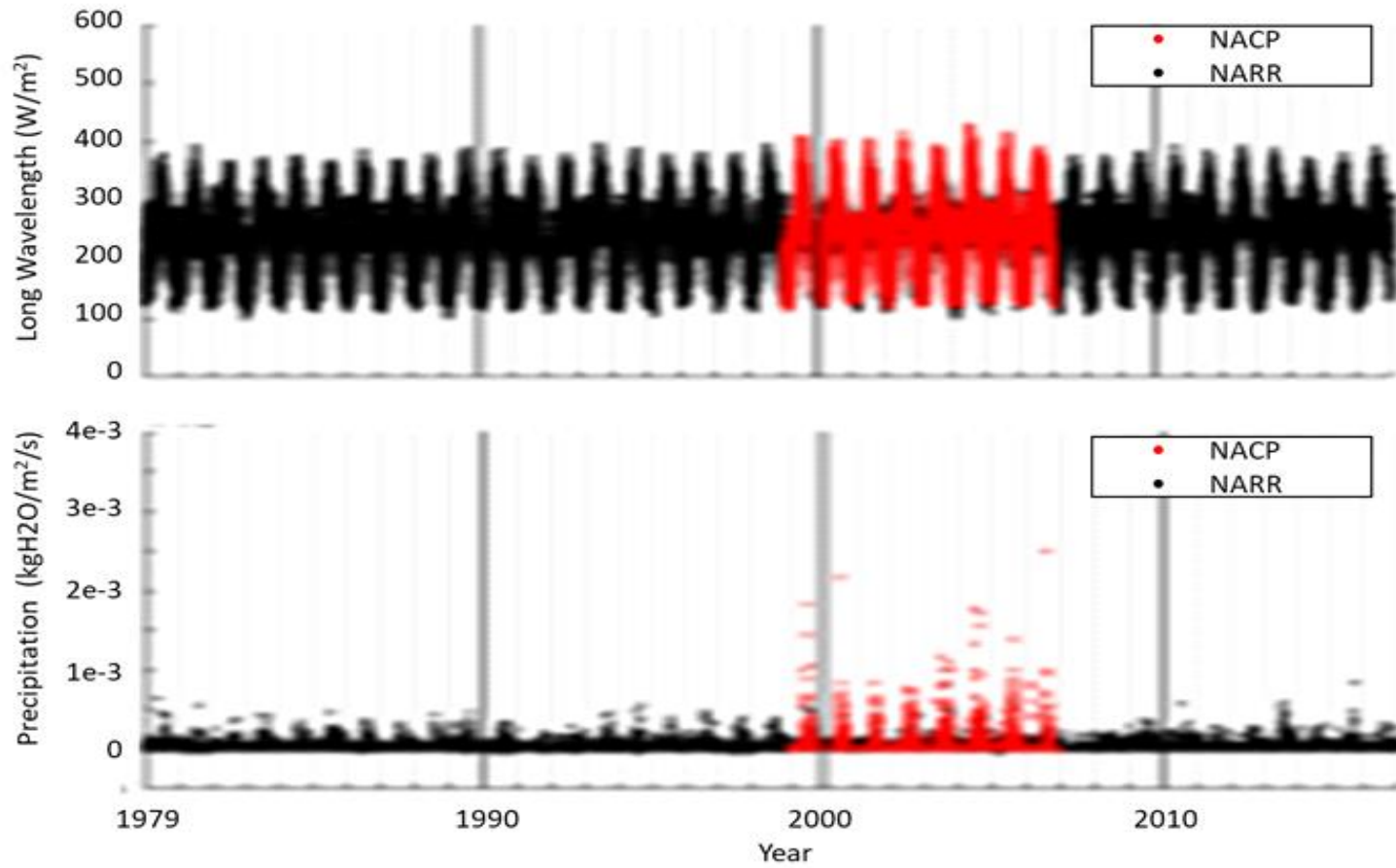
Zona, D., Oechel, W. C., Richards, J. H., Hastings, S., Kopetz, I., Ikawa, H., & Oberbauer, S. (2011). Light-stress avoidance mechanisms in a Sphagnum -dominated wet coastal Arctic tundra ecosystem in Alaska. *Ecology*, 92(3), 633-644. <https://doi.org/10.1890/10-0822.1>



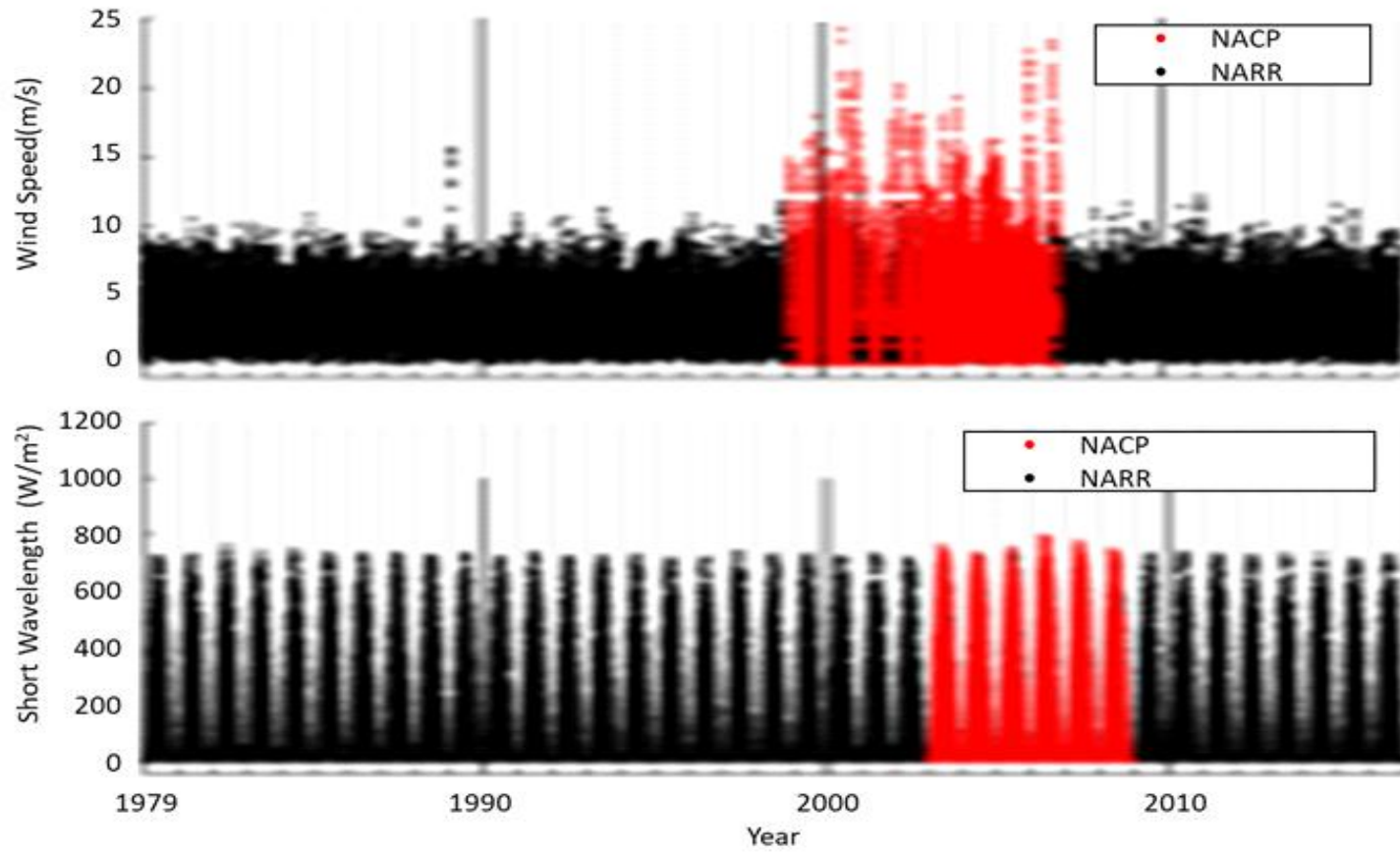
[부록 1] US-Brw, US-Atq, Toolik 극지연구소 사이트에서 지상측정 기상자료 및 NARR 기상자료



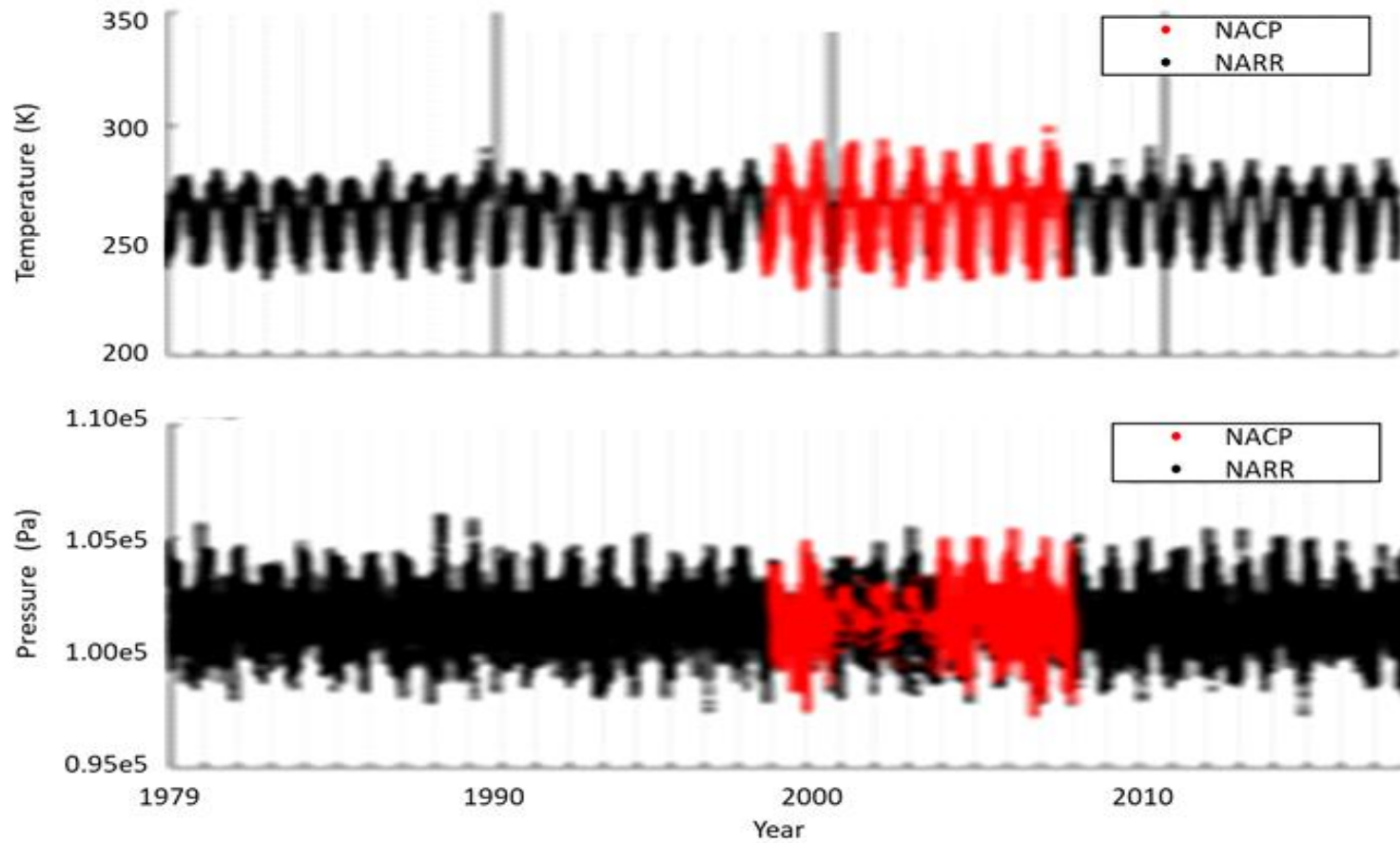
<부록 그림1-1> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Atq 사이트 대기온도(K)와 대기압(Pa) 자료



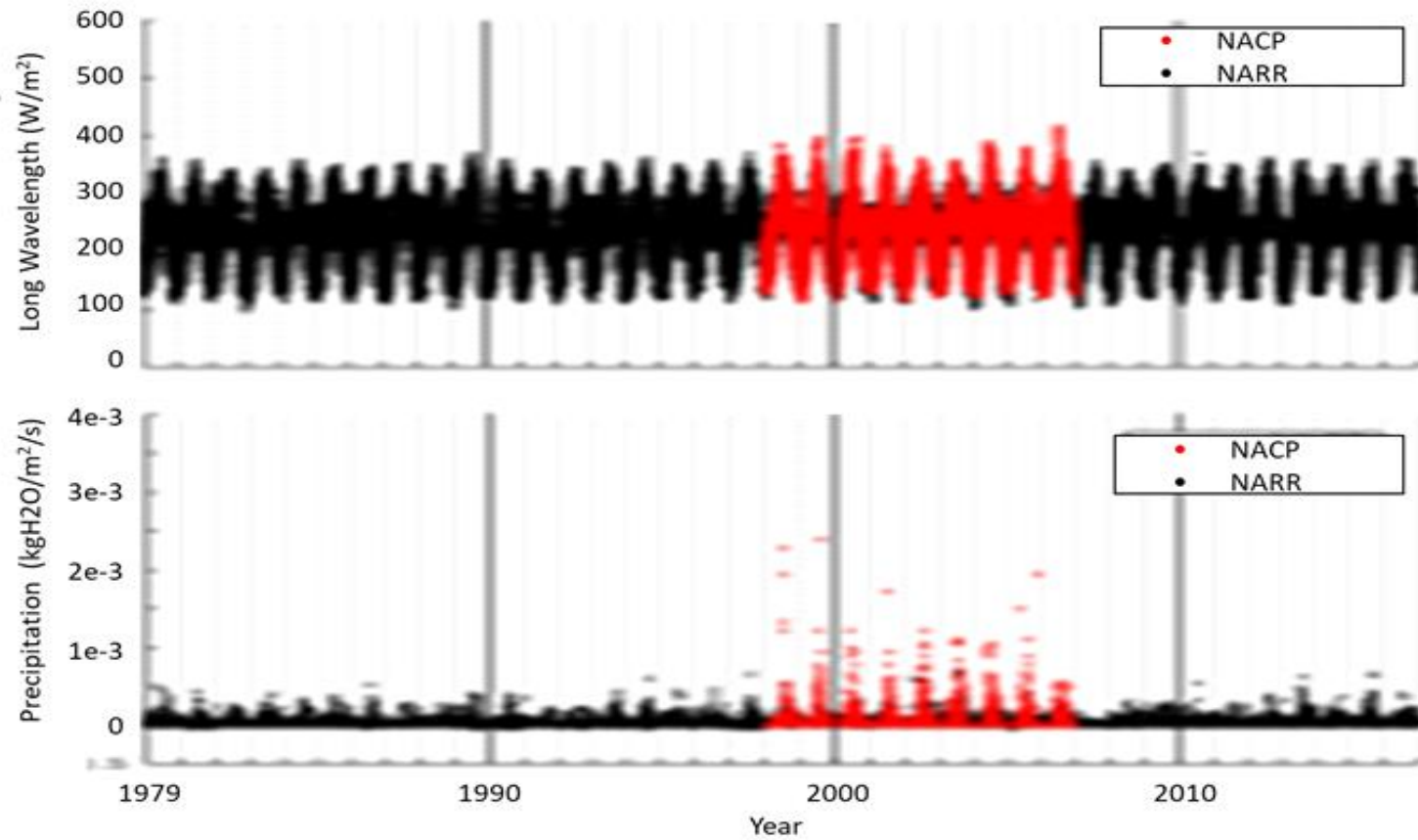
<부록 그림1-2> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Atq 사이트 강수량(kg H₂O/m²/s) 및 장파장(W/m²) 자료



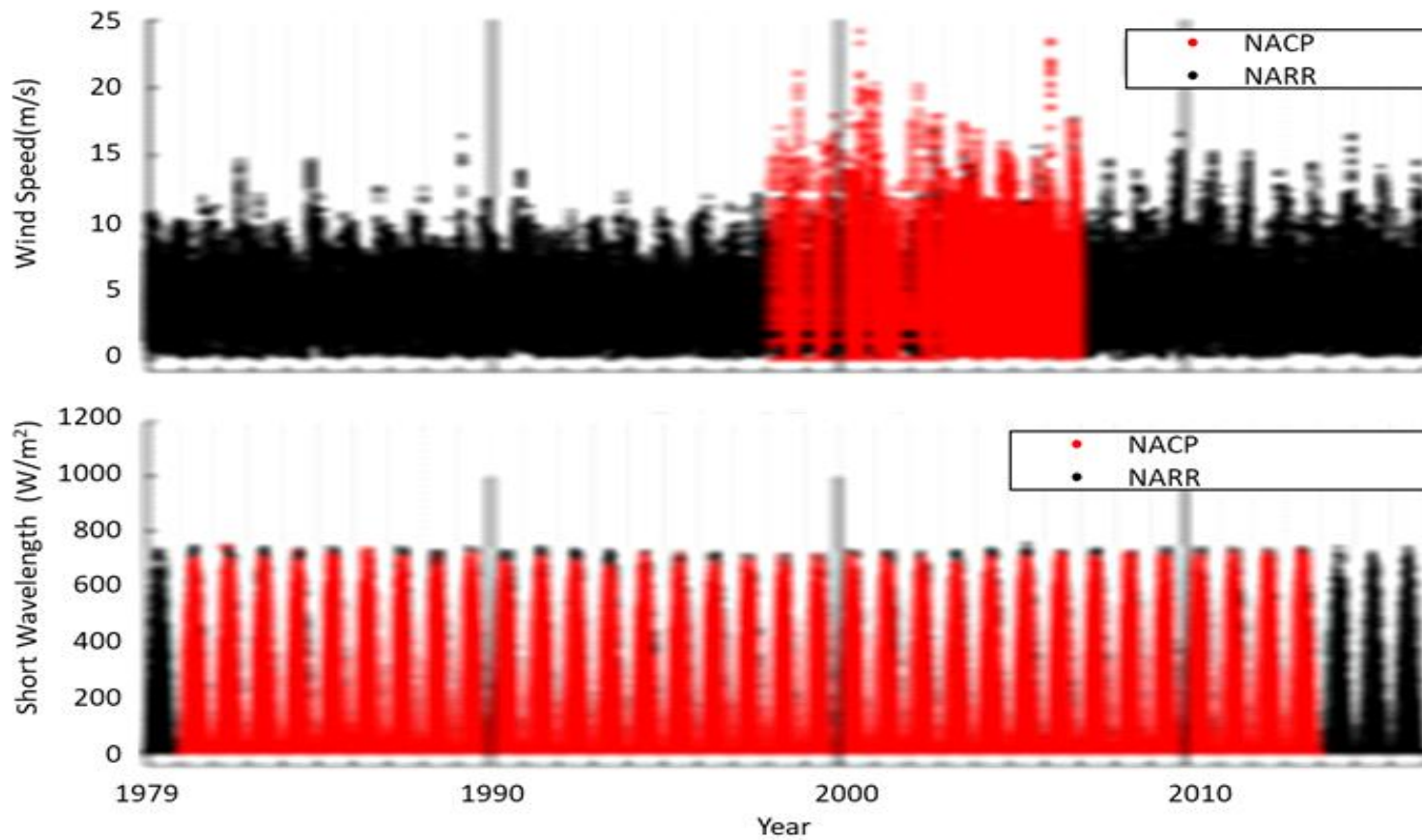
<부록 그림1-3> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Atq 사이트 풍속(m/s) 및 단파장(W/m²) 자료



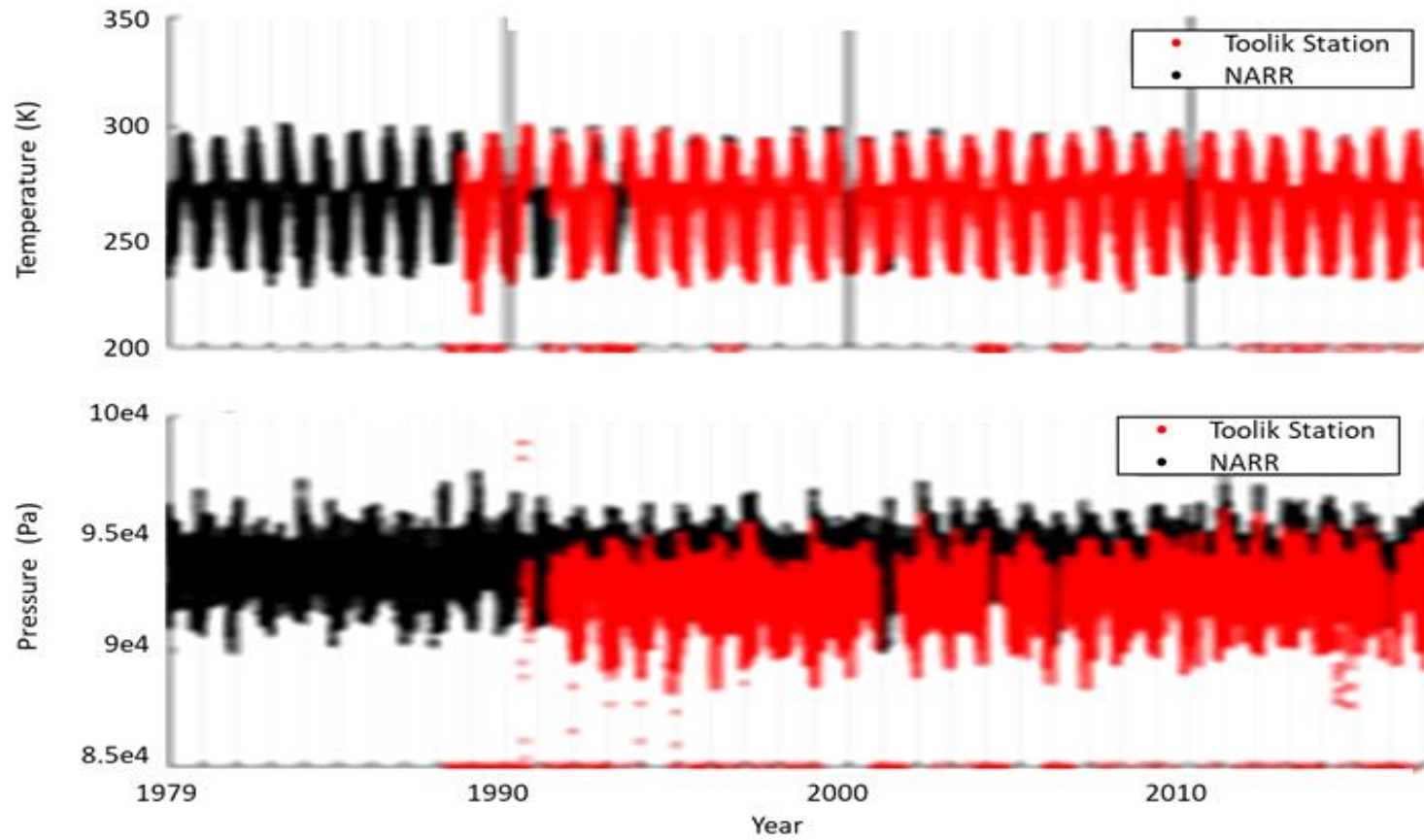
<부록 그림1-4> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Brw 사이트 대기온도(K)와 대기압(Pa) 자료



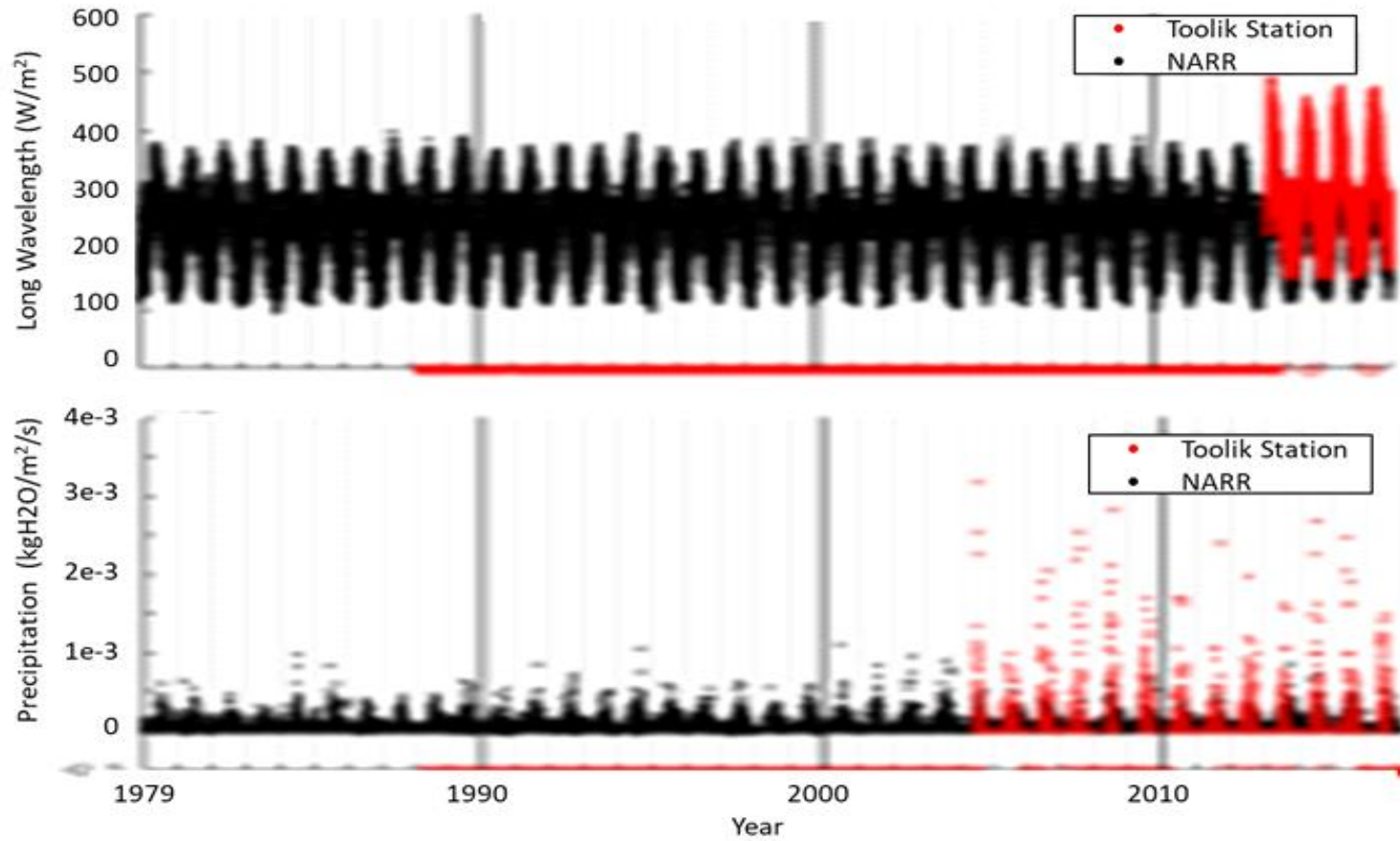
<부록 그림1-5> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Brw 사이트 강수량(kg H₂O/m²/s) 및 장파장(W/m²) 자료



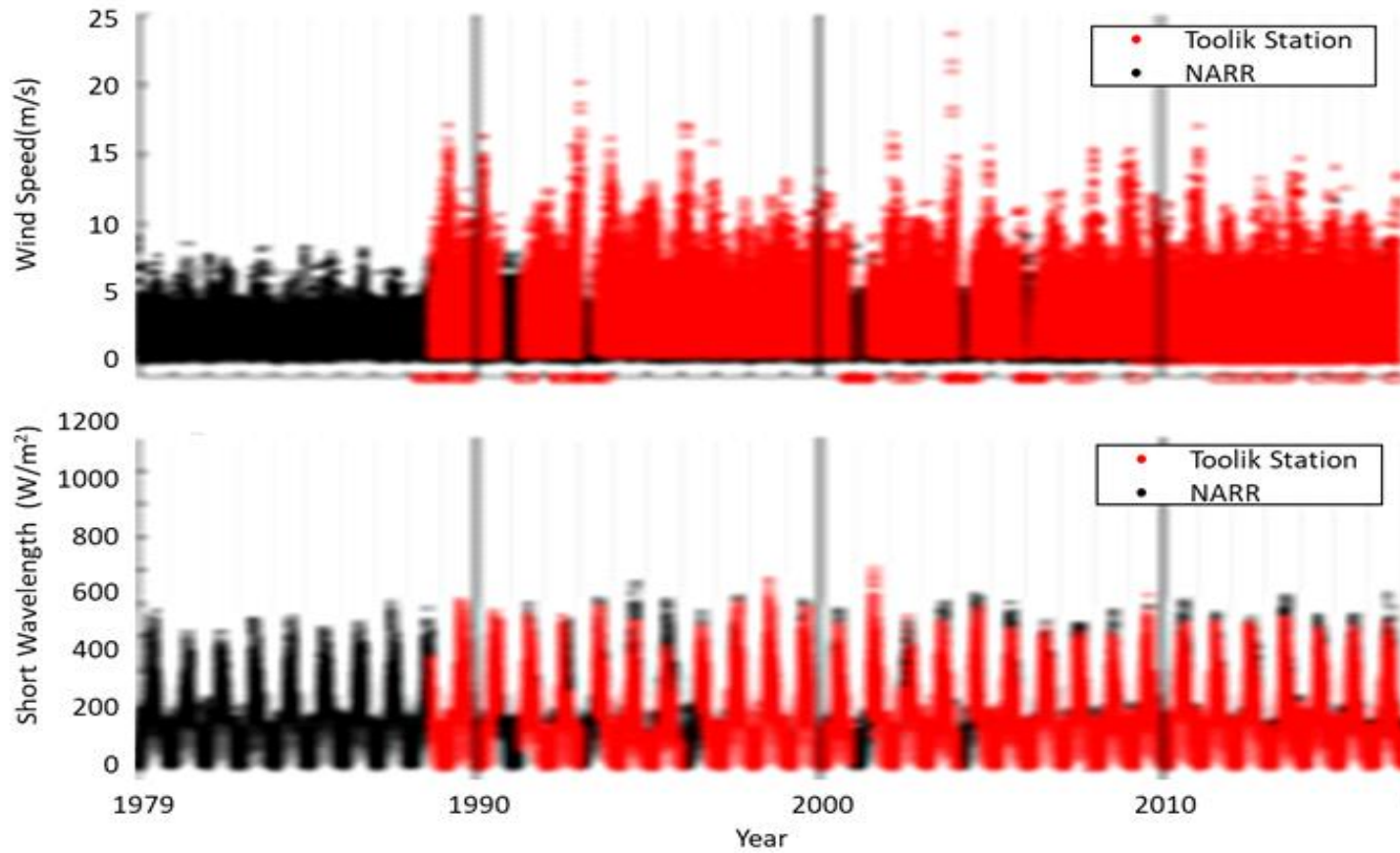
<부록 그림1-6> NACP와 NARR에서 제공하는 US-Brw 사이트 풍속(m/s) 및 단파장(W/m²) 자료



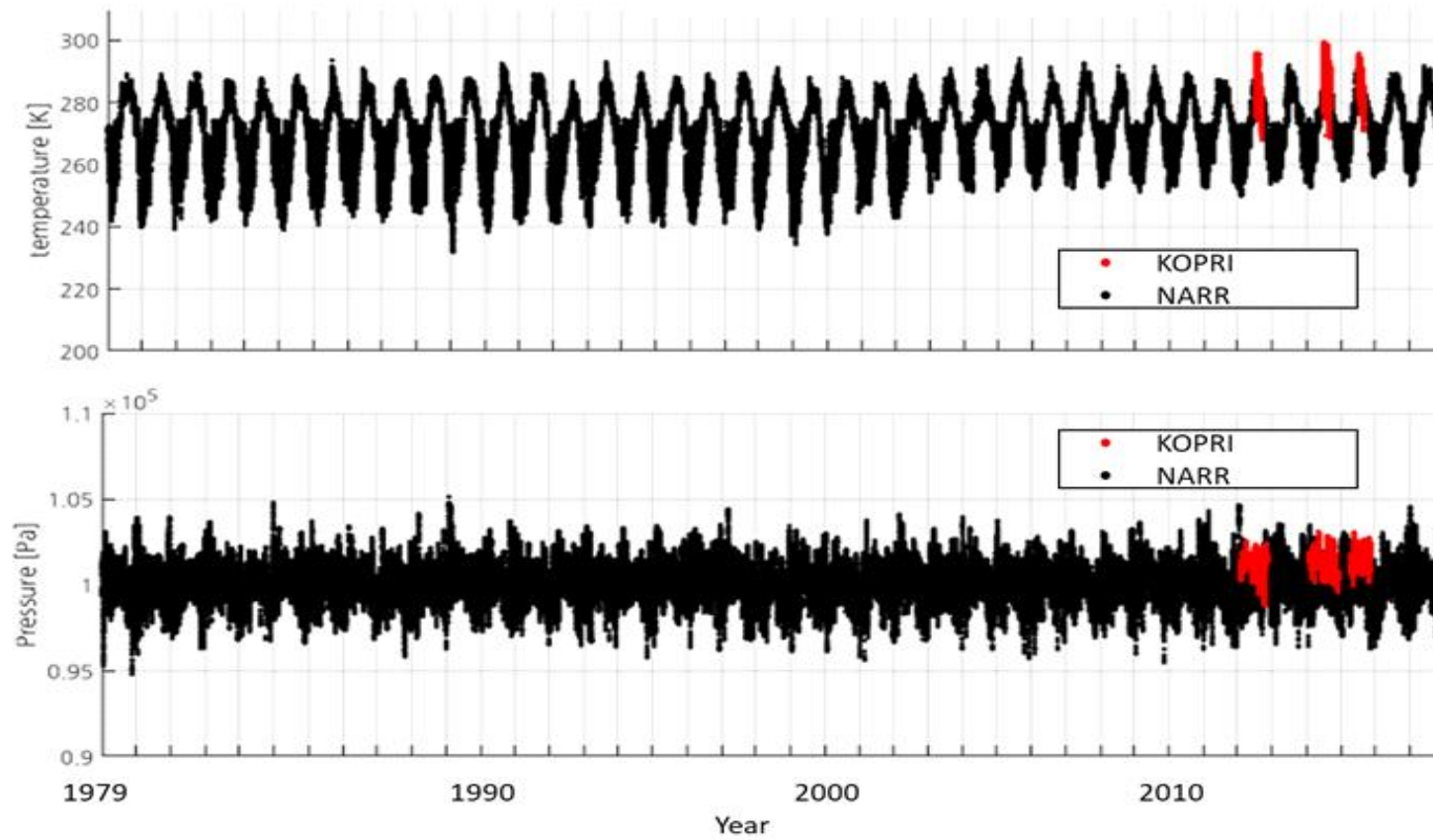
<부록 그림1-7> Toolik station와 NARR에서 제공하는 Toolik 사이트 대기온도(K)와 대기압(Pa) 자료



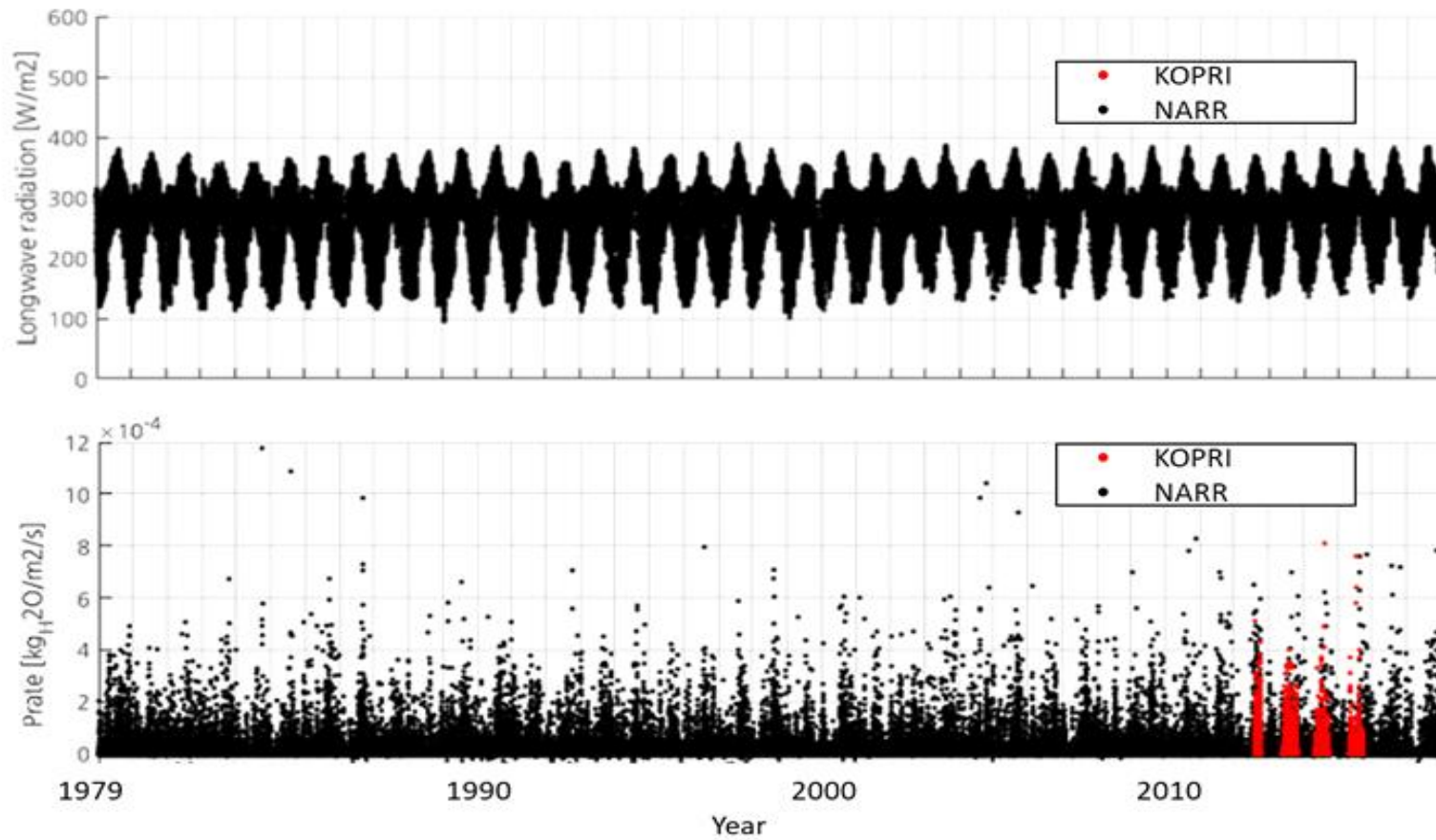
<부록 그림1-8> Toolik Station와 NARR에서 제공하는 Toolik 사이트 강수량(kg H₂O/m²/s) 및 장파장(W/m²) 자료



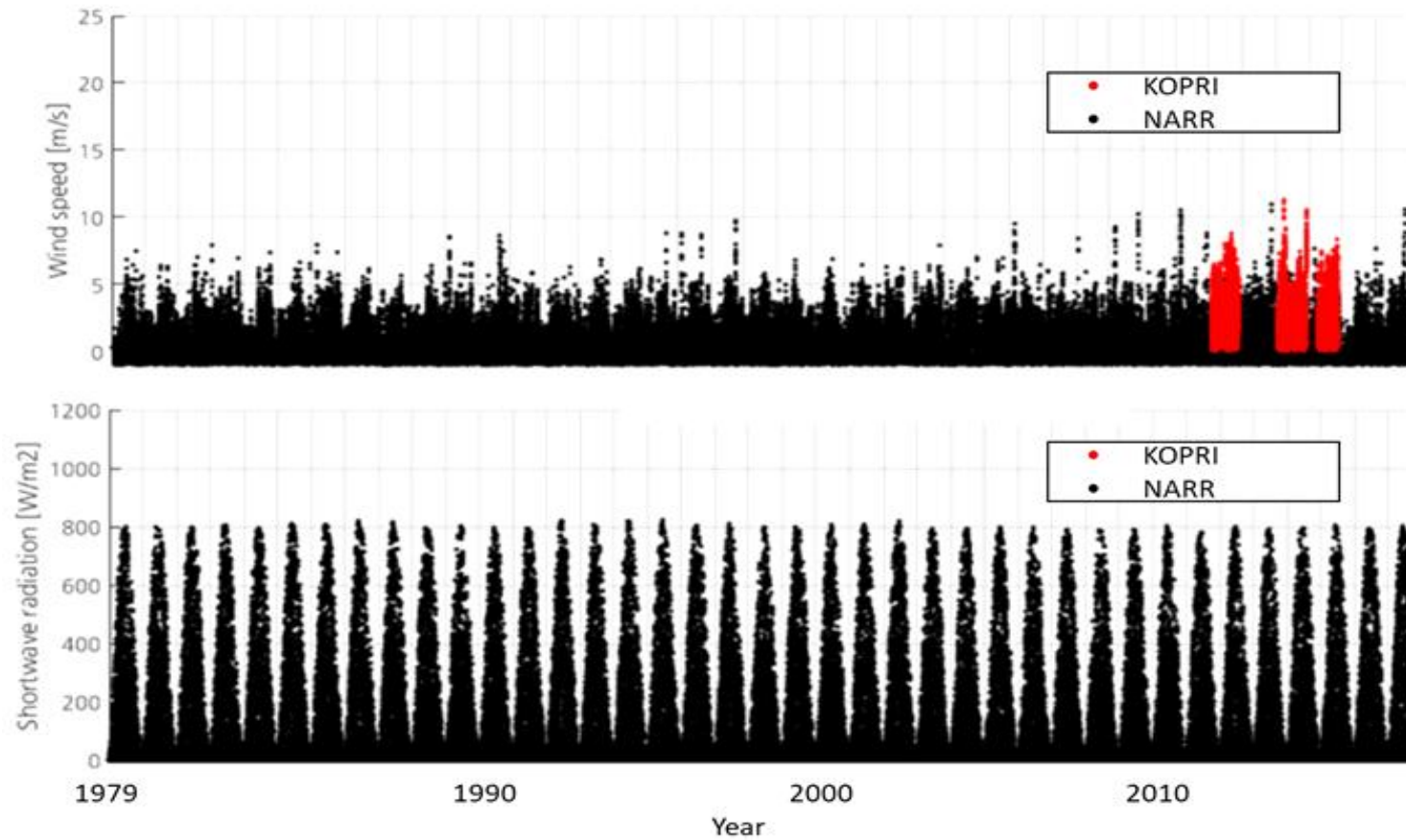
<부록 그림1-9> Toolik Station와 NARR에서 제공하는 Toolik 사이트 풍속(m/s) 및 단파장(W/m²) 자료



<부록 그림1-10> 극지연구소(KOPRI)와 NARR에서 제공하는 Council 사이트 대기온도(K)와 대기압(Pa) 자료

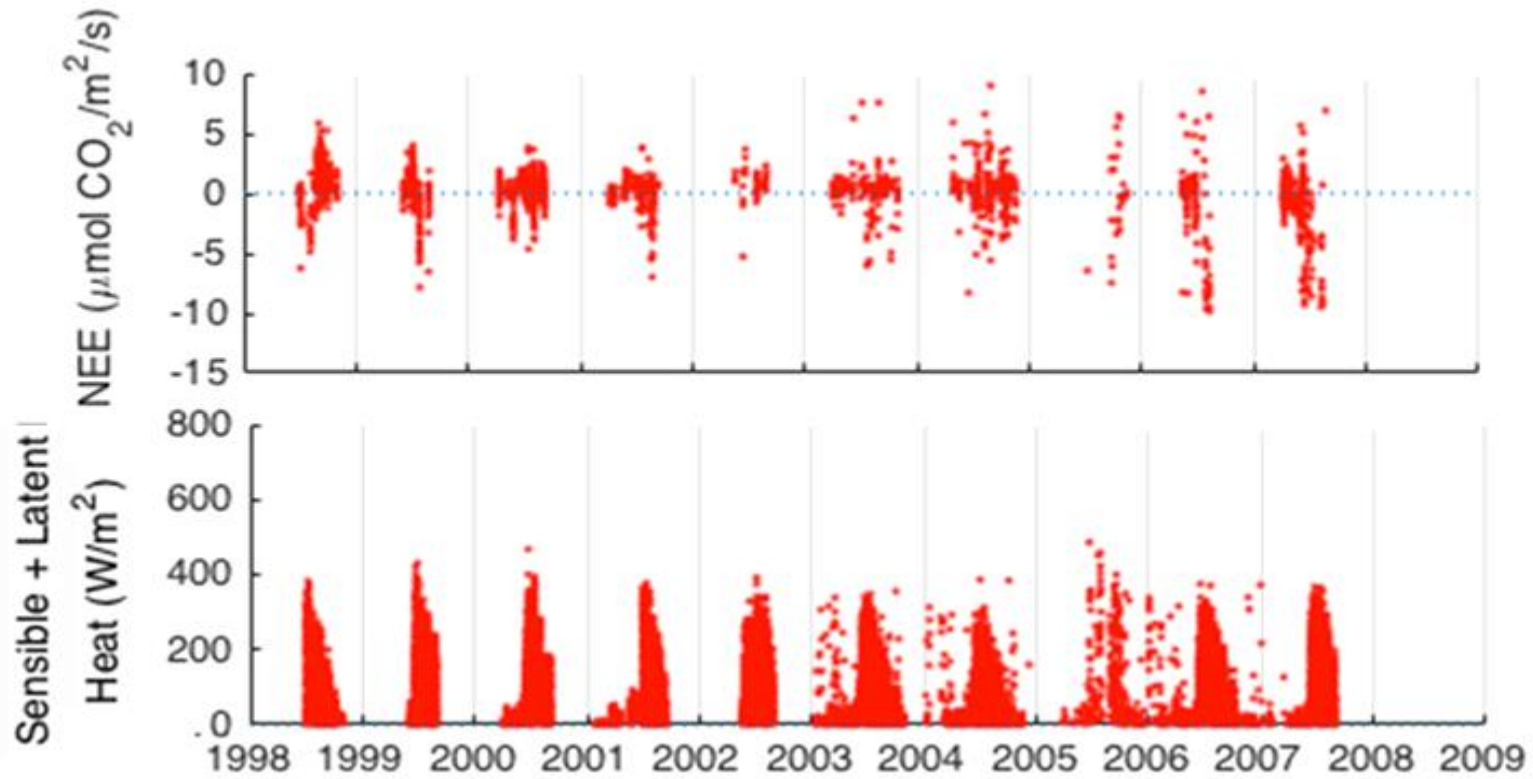


<부록 그림1-11> 극지연구소(KOPRI)와 NARR에서 제공하는 Council 사이트 강수량($\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) 및 장파장(W/m^2) 자료

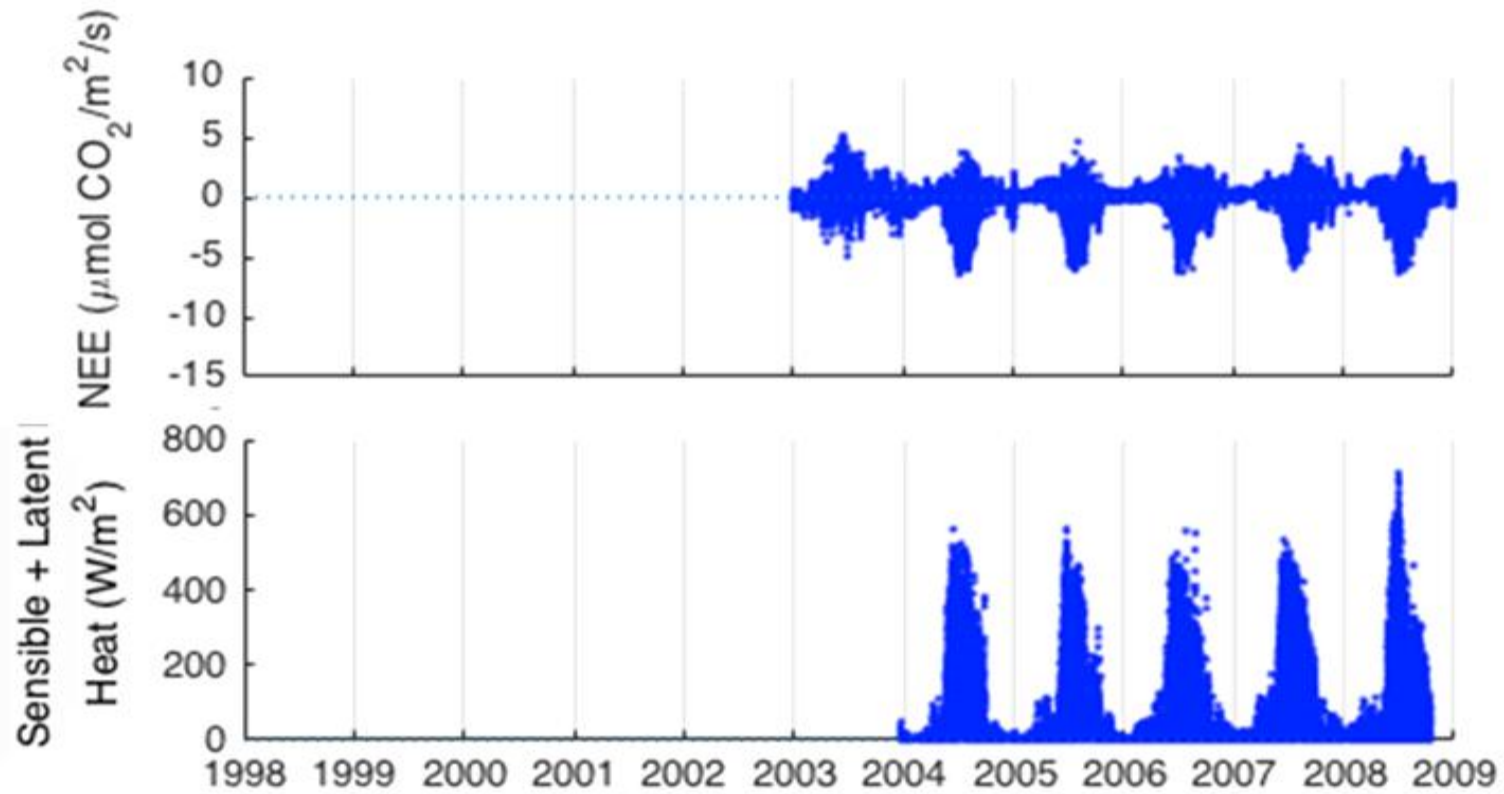


<부록 그림1-12> 극지연구소(KOPRI)와 NARR에서 제공하는 Council 사이트 풍속(m/s) 및 단파장(W/m²) 자료

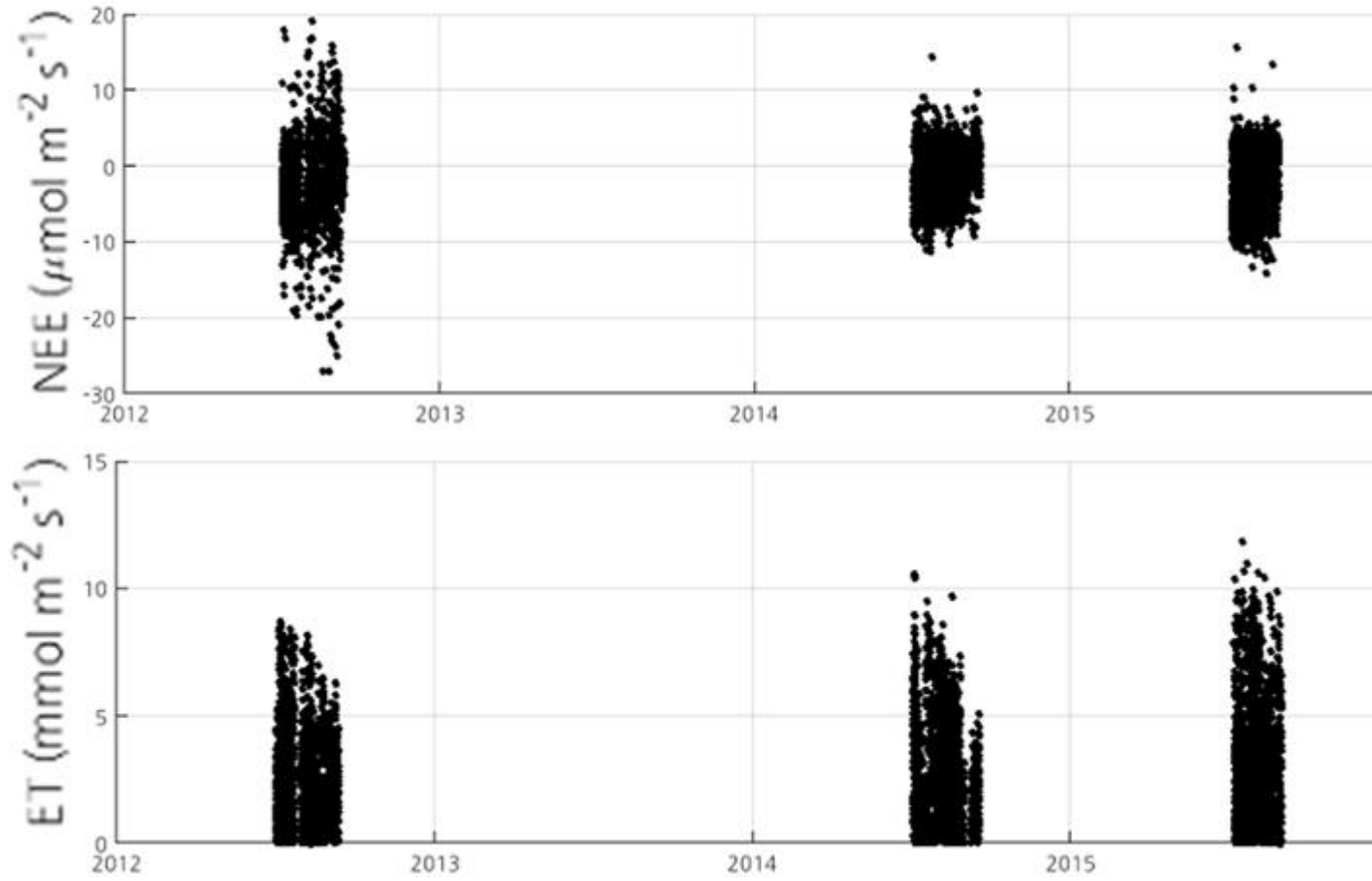
[부록 2] US-Brw, US-Atq, 극지연구소 타워에서 측정한 플럭스 자료



<부록 그림2-1> US-Brw 타워에서 측정한 순생태계교환량(NEE)과 에너지(잠열+현열) 플럭스



<부록 그림2-2> US-Atq 타워에서 측정된 순생태계교환량(NEE)과 에너지(잠열+현열) 플럭스



<부록 그림2-3> KOPRI 타워에서 측정된 순생태계교환량(NEE) 과 증발산(ET)

[부록 3] 본 연구에서 개발된 ED2 식생계절 모듈 소스 코드

```

subroutine update_phenology(doy, cpoly, isi, lat, veget_dyn_on)
  use ed_state_vars , only : polygontype      & ! structure
                                , sitetype      & ! structure
                                , patchtype     !! structure
  use grid_coms     , only : nzg             !! intent(in)
  use pft_coms      , only : phenology       & ! intent(in)
                                , c2n_leaf     & ! intent(in)
                                , l2n_stem     & ! intent(in)
                                , c2n_stem     & ! intent(in)
                                , c2n_storage  & ! intent(in)
                                , f_labile_leaf !! intent(in)
  use phenology_coms, only : retained_carbon_fraction & ! intent(in)
                                , iphen_scheme & ! intent(in)
                                , elongf_min    & ! intent(in)
                                , elongf_flush  !! intent(in)
  use consts_coms   , only : t3ple          & ! intent(in)
                                , cice         & ! intent(in)
                                , cliq        & ! intent(in)
                                , alli        !! intent(in)
  use ed_therm_lib  , only : calc_veg_hcap   & ! function
                                , update_veg_energy_cweh !! subroutine
  use ed_max_dims   , only : n_pft         !! intent(in)
  use ed_misc_coms  , only : current_time   !! intent(in)
  use allometry     , only : area_indices   & ! subroutine
                                , ed_biomass   & ! function
                                , size2bl     !! function
  use stable_cohorts, only : is_resolvable  !! function
  use phenology_aux , only : daylength      !! function
  implicit none
  !----- Arguments -----!
  type(polygontype) , target  :: cpoly
  real               , intent(in) :: lat
  integer            , intent(in) :: doy
  integer            , intent(in) :: isi
  logical            , intent(in) :: veget_dyn_on
  !----- Local variables -----!
  type(sitetype)    , pointer  :: csite
  type(patchtype)   , pointer  :: cpatch
  integer            :: ipa
  integer            :: ico
  integer            :: isoil_lev
  integer            :: kroot
  integer            :: ipft

```

```

logical                :: leaf_out_cold
logical                :: drop_cold
real                   :: daylight
real                   :: daylight_yday
real                   :: delta_bleaf
real                   :: bl_max
real                   :: old_leaf_hcap
real                   :: old_wood_hcap
real                   :: elongf_try
real                   :: elongf_grow

! ----- External functions -----!
!   real, external :: daylength

!----- Variables used only for debugging purposes. -----!
logical                , parameter :: printphen=.false.
logical, dimension(n_pft), save    :: first_time=.true.

!-----!

!----- Level to evaluate the soil temperature. -----!
isoil_lev= nzg

!----- Calculate daylight for this gridcell. -----!
daylight = daylength(lat, doy)

!----- Loop over patches. -----!
csite=> cpoly%site(isi)

patchloop: do ipa= 1,csite%npatches
  cpatch=> csite%patch(ipa)

  !----- Re-initialize litter inputs. -----!
  csite%fsc_in(ipa) = 0.0
  csite%fsn_in(ipa) = 0.0
  csite%ssc_in(ipa) = 0.0
  csite%ssl_in(ipa) = 0.0

  !----- Determine what phenology thresholds have been crossed. -----!
  call phenology_thresholds(daylight,csite%soil_tempk(isoil_lev,ipa)      &
                           ,csite%sum_chd(ipa),csite%sum_dgd(ipa)
&
                           ,drop_cold,leaf_out_cold)

  cohortloop: do ico= 1,cpatch%ncohorts

```

```

ipft   = cpatch%pft(ico)
kroot  = cpatch%krdepth(ico)

!----- Initially, we assume all leaves stay. -----!
cpatch%leaf_drop(ico) = 0.0

!----- Find cohort-specific thresholds. -----!
select case (iphen_scheme)
case (1)
  !----- Get cohort-specific thresholds for prescribed phenology. -----!
  call assign_prescribed_phen(cpoly%green_leaf_factor(ipft,isi)      &
                             ,cpoly%leaf_aging_factor(ipft,isi)     &
                             ,cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),ipft  &
                             ,drop_cold,leaf_out_cold,bl_max)

case default
  !----- Drop_cold is computed in phenology_thresholds for Bottascheme. ---!
  if (drop_cold) bl_max= 0.0
end select

```



```

! Here we decide what to do depending on the phenology habit. There are
! five different types:
! 0. Evergreen - neither cold nor drought makes these plants to drop
!               their leaves;
! 1. Drought deciduous - these plants will drop all leaves when drought
!                       conditions happen. By drought conditions we mean a
!                       time when the available water drops below a threshold
! 2. Cold deciduous - these plants will drop their leaves when cold
!                   conditions happen.
! 3. Light phenology - these plants will control their leaf structure with
!                   the light history (last 10 days). They are also
!                   drought-deciduous, similar to phenology 4;
! 4. Drought deciduous - similar to one, but the threshold is compared against
!                   a 10-day running average rather than the instant-
!                   aneousvalue.
! 5. Cold-Drought-Light deciduous - iGSI-based phenology.

```

```

select case (phenology(ipft))
case (0)

```

```

!-----!
!   Evergreen, there is nothing to be done here except to assign maximum
!   elongation factor.                                     !
!-----!

cpatch%elongf(ico) = 1.0

!-----!

case (1)

!-----!

!   Drought deciduous. Now we must check whether the plants still have
!   enough water or it is too dry, or if there is some drought relief so
!   leaves can start to grow again.                       !
!-----!

!----- This is the first guess for the new elongation factor. -----!
elongf_try = max(0.0, min (1.0, cpatch%paw_avg(ico)))

!-----!

if (elongf_try < 1.0 .and. cpatch%phenology_status(ico) /= -2) then
!----- It is time to drop leaves. Drop all leaves. -----!
cpatch%leaf_drop(ico) = (1.0 - retained_carbon_fraction) &
* cpatch%bleaf(ico)

!-----!

!----- Update plant carbon pools.-----!
cpatch%balive (ico) = cpatch%balive(ico) - cpatch%bleaf(ico)
cpatch%bleaf (ico) = 0.0
cpatch%elongf (ico) = 0.0
cpatch%phenology_status(ico) = -2

!-----!

!----- Update storage only if vegetation dynamics is on. -----!
if (veget_dyn_on) then
cpatch%bstorage(ico) = cpatch%bstorage(ico)
+ cpatch%bleaf(ico) * retained_carbon_fraction
end if

!-----!

```

```

!-----!
!      Send the lost leaves to soil carbon and nitrogen pools.      !
!-----!

csite%fsc_in(ipa) = csite%fsc_in(ipa)                                &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)    &
                    * f_labile_leaf(ipft)                            &
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa)                                &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)    &
                    * f_labile_leaf(ipft) / c2n_leaf(ipft)          &
csite%ssc_in(ipa) = csite%ssc_in(ipa)                                &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)    &
                    * (1.0 - f_labile_leaf(ipft))                    &
csite%ssl_in(ipa) = csite%ssl_in(ipa)                                &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)    &
                    * (1.0 - f_labile_leaf(ipft))                    &
                    * l2n_stem / c2n_stem(ipft)                      &
!-----!
!-----!
!      Contribution due to the fact that c2n_leaf and c2n_storage may be !
!      different.                                                       !
!-----!

csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa)                                &
                    + cpatch%leaf_drop(ico) * cpatch%nplant(ico)    &
                    * (1.0 / c2n_leaf(ipft) - 1.0 / c2n_storage)    &
!-----!
!-----!
!      Deduct the leaf drop from the carbon balance.                   !
!-----!

cpatch%cb          (13,ico) = cpatch%cb          (13,ico)          &
                          - cpatch%leaf_drop    (ico)              &
cpatch%cb_lightmax(13,ico) = cpatch%cb_lightmax(13,ico)          &
                          - cpatch%leaf_drop    (ico)              &
cpatch%cb_moistmax(13,ico) = cpatch%cb_moistmax(13,ico)          &
                          - cpatch%leaf_drop    (ico)              &
cpatch%cb_mlmax(13,ico)   = cpatch%cb_mlmax(13,ico)              &

```

```

- cpatch%leaf_drop(ico)

!-----!

elseif(elongf_try> 1.0 .and. cpatch%phenology_status(ico) == -2) then

!-----!

!     It is time to flush. Change phenology_status will update carbon !
!     pools in growth_balive.                                         !

!-----!

if (veget_dyn_on) then
  cpatch%phenology_status(ico) = 1
  cpatch%elongf      (ico) = 1.0
else

!-----!

!     When vegetation dynamics is off, instantaneously update tissues

!-----!

cpatch%bleaf(ico) = size2bl(cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),ipft)
cpatch%balive(ico) = cpatch%balive(ico) + cpatch%bleaf(ico)
cpatch%phenology_status(ico) = 0
cpatch%elongf      (ico) = 1.0

!-----!

end if

!-----!

end if ! critical moisture

!-----!

!     Cold deciduous. Here we must check two possibilities:         !
!                                                                     !
! 1. It is cold, and the plants have leaves, so we flag them with   !
!     phenology_status=0 (leaves not growing) and the plants will start !
!     losing their leaves;                                           !
! 2. The plant has no leaves, but the temperature and light conditions are !
!     okay again, and leaves can start growing.                       !

!-----!

if (cpatch%phenology_status(ico) /= -2 .and. drop_cold) then
  if (cpoly%green_leaf_factor(ipft,isi) < elongf_min) then
    bl_max= 0.0
  end if

```

```
delta_bleaf= cpatch%bleaf(ico) - bl_max
```

```
if (delta_bleaf> 0.0) then
```

```
!-----!  
!   Phenology_status= 0 means that the plant has leaves, but they !  
! are not growing (not necessarily because the leaves are fully !  
! flushed). !  
!-----!  
cpatch%phenology_status(ico) = -1  
cpatch%leaf_drop(ico) = (1.0 - retained_carbon_fraction) * delta_bleaf  
csite%fsc_in(ipa) = csite%fsc_in(ipa) &  
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &  
* f_labile_leaf(ipft)  
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) &  
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &  
* f_labile_leaf(ipft) / c2n_leaf(ipft)  
csite%ssc_in(ipa) = csite%ssc_in(ipa) &  
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &  
* (1.0 - f_labile_leaf(ipft))  
csite%ssl_in(ipa) = csite%ssl_in(ipa) &  
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &  
* (1.0 - f_labile_leaf(ipft)) &  
* l2n_stem / c2n_stem(ipft)  
!----- Adjust plant carbon pools. -----!  
cpatch%balive(ico) = cpatch%balive(ico) - delta_bleaf  
if (veget_dyn_on) then  
    cpatch%bstorage(ico) = cpatch%bstorage(ico) &  
+ retained_carbon_fraction* delta_bleaf  
end if  
!-----!  
!   Contribution due to the fact that c2n_leaf and c2n_storage may !  
! be different. !  
!-----!  
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) &  
+ delta_bleaf* cpatch%nplant(ico) &  
* retained_carbon_fraction &  
* (1.0 / c2n_leaf(ipft) - 1.0/c2n_storage)  
cpatch%bleaf(ico) = bl_max
```



```

!-----!
!       Deduct the leaf drop from the carbon balance.       !
!-----!

cpatch%cb      (13,ico) = cpatch%cb      (13,ico)      &
                    - cpatch%leaf_drop  (ico)
cpatch%cb_lightmax(13,ico) = cpatch%cb_lightmax(13,ico) &
                    - cpatch%leaf_drop  (ico)
cpatch%cb_moistmax(13,ico) = cpatch%cb_moistmax(13,ico) &
                    - cpatch%leaf_drop  (ico)
cpatch%cb_mlmax(13,ico)   = cpatch%cb_mlmax(13,ico) &
                    - cpatch%leaf_drop(ico)

!-----!

end if
!----- Set status flag. -----!
if (bl_max== 0.0) then
    cpatch%phenology_status(ico) = -2
    cpatch%elongf(ico) = 0.
else
    cpatch%elongf(ico) = 1.0 ! It should become green_leaf_factor...
end if

elseif (.not. drop_cold.and. cpatch%phenology_status(ico) == -2      &
        .and. leaf_out_cold) then

!-----!

!       Update the phenology status (1 means that leaves are growing), !
!-----!

if (veget_dyn_on) then
    cpatch%phenology_status(ico) = 1
    cpatch%elongf      (ico) = 1.0
else
    cpatch%phenology_status(ico) = 0
    cpatch%elongf      (ico) = 1.0
    cpatch%bleaf(ico) = cpoly%green_leaf_factor(ipft,isi)      &
                    * size2bl(cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),ipft)
    cpatch%balive(ico) = cpatch%balive(ico) + cpatch%bleaf(ico)
end if

!-----!

end if

```

```

case (5) ! phenology(ipft) J.Kim!

daylight_yday= daylength(lat, doy-1)

!-----!
!           !   Beginning & early GS           !
!-----!
!
!           if(daylight > daylight_yday.or. daylight == 1440) then ! J.Kim!

if (cpatch%elongf(ico) < cpatch%gsi(ico)) then
cpatch%elongf(ico) = cpatch%gsi(ico)
cpoly%green_leaf_factor(ipft,isi) = cpatch%gsi(ico)

        if (veget_dyn_on) then
cpatch%phenology_status(ico) = 1
cpatch%bleaf(ico) = cpoly%green_leaf_factor(ipft,isi)      &
size2bl(cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),ipft)
cpatch%balive(ico) = cpatch%balive(ico) + cpatch%bleaf(ico)
else
!-----!
!           !   Phenology_status= 0 means that the plant has leaves, but they
!           !   are not growing (not necessarily because the leaves are fully
!           !   flushed).
!-----!
cpatch%phenology_status(ico) = 0
        end if
end if

!-----!
!           !   Late & End of GS           !
!-----!
!
elseif (daylight < daylight_yday.or. daylight == 0) then ! from MCD15. J.Kim

if (cpatch%elongf(ico) > cpatch%gsi(ico)) then ! only descending !
cpatch%elongf(ico) = cpatch%gsi(ico)
cpatch%phenology_status(ico) = -1
end if
bl_max= cpatch%elongf(ico) * size2bl(cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),ipft)

```

```

delta_bleaf= cpatch%bleaf(ico) - bl_max
if (delta_bleaf> 0.0) then

!-----!
!   Phenology_status= -1 means that the plant is dropping its leaves
!   after reallocating a portion (0.5 as of 3/13/2019) excessive C   !
!-----!

cpatch%leaf_drop(ico) = (1.0 - retained_carbon_fraction) * delta_bleaf
csite%fsc_in(ipa) = csite%fsc_in(ipa) &
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &
* f_labile_leaf(ipft)
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) &
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &
* f_labile_leaf(ipft) / c2n_leaf(ipft)
csite%ssc_in(ipa) = csite%ssc_in(ipa) &
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &
* (1.0 - f_labile_leaf(ipft))
csite%ssl_in(ipa) = csite%ssl_in(ipa) &
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico) &
* (1.0 - f_labile_leaf(ipft)) &
* l2n_stem / c2n_stem(ipft)

!----- Adjust plant carbon pools.
!-----!

cpatch%balive(ico) = cpatch%balive(ico) - delta_bleaf
if (veget_dyn_on) then
    cpatch%bstorage(ico) = cpatch%bstorage(ico) &
+ retained_carbon_fraction* delta_bleaf
end if

!-----!
!   Contribution due to the fact that c2n_leaf and c2n_storage may !
!   be different. !
!-----!

csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) &
+ delta_bleaf* cpatch%nplant(ico) &
* retained_carbon_fraction &
* (1.0 / c2n_leaf(ipft) - 1.0/c2n_storage)
cpatch%bleaf(ico) = bl_max

!-----!

```

```

!      Deduct the leaf drop from the carbon balance.      !
!-----!
      cpatch%cb      (13,ico) = cpatch%cb      (13,ico)      &
      - cpatch%leaf_drop      (ico)
      cpatch%cb_lightmax(13,ico) = cpatch%cb_lightmax(13,ico)      &
      - cpatch%leaf_drop      (ico)
      cpatch%cb_moistmax(13,ico) = cpatch%cb_moistmax(13,ico)      &
      - cpatch%leaf_drop      (ico)
      cpatch%cb_mlmax(13,ico) = cpatch%cb_mlmax(13,ico) &
      - cpatch%leaf_drop(ico)

      end if
      if (bl_max== 0.0) then
          cpatch%phenology_status(ico) = -2
      end if
      end if

      case (3,4)

!-----!
!      Drought deciduous. Here we must check two possibilities:      !
!      !
!      1. The soil has been dry recently, and the plants have leaves, so we flag      !
!      them with phenology_status=0 (leaves not growing) and the plants will      !
!      start losing their leaves;      !
!      2. The plant has no leaves, but the soil has started to come back to more      !
!      moist conditions. Given this situation, leaves can start growing      !
!      again.      !
!-----!

!----- This is the first guess for the new elongation factor. -----!
      elongf_try = max(0.0, min (1.0, cpatch%paw_avg(ico)))
!----- If extremely dry, force the cohort to shed all leaves... ---!
      if (elongf_try< elongf_min) elongf_try= 0.0

!-----!

!----- Find the maximum allowed leaf biomass. -----!
      bl_max= elongf_try* size2bl(cpatch%dbh(ico),cpatch%hite(ico),iptf)

!-----!
!-----!

!      Delta_bleafis the difference between the current leaf biomass and      !
!      the maximum permitted given the soil moisture conditions. If delta_bleaf!
!      is positive, it means that the plant has more leaves than it should.      !

```

```

!-----!
delta_bleaf= cpatch%bleaf(ico) - bl_max

!-----!
!    Check whether drought is becoming more or less severe.

!-----!
if (delta_bleaf> 0.0) then

!-----!

!    Drought conditions are becoming more severe, drop leaves.

!-----!

if (elongf_try>= elongf_min) then
    cpatch%phenology_status(ico) = -1
else
    cpatch%phenology_status(ico) = -2
end if
cpatch%leaf_drop(ico) = (1.0 - retained_carbon_fraction) * delta_bleaf
cpatch%elongf    (ico) = elongf_try
!----- Adjust plant carbon pools. -----!
cpatch%bleaf    (ico) = bl_max
cpatch%balive   (ico) = cpatch%balive(ico) - delta_bleaf
if (veget_dyn_on) then
    cpatch%bstorage (ico) = cpatch%bstorage(ico)
                        + retained_carbon_fraction* delta_bleaf
end if

!-----!
!-----!
!
!    Send the lost leaves to soil carbon and nitrogen pools.    !
!-----!

csite%fsc_in(ipa) = csite%fsc_in(ipa) &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)
                    * f_labile_leaf(ipft)
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) &
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)
                    * f_labile_leaf(ipft) / c2n_leaf(ipft)
csite%ssc_in(ipa) = csite%ssc_in(ipa)
                    + cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)
                    * ( 1.0 - f_labile_leaf(ipft) )

```

```

csite%ssl_in(ipa) = csite%ssl_in(ipa) &
+ cpatch%nplant(ico) * cpatch%leaf_drop(ico)
* ( 1.0 - f_labile_leaf(ipft) ) &
* l2n_stem / c2n_stem(ipft)

!-----!
! Contribution due to the fact that c2n_leaf and c2n_storage may be
! different.

!-----!
csite%fsn_in(ipa) = csite%fsn_in(ipa) + delta_bleaf*cpatch%nplant(ico) &
* retained_carbon_fraction
&
* (1.0 / c2n_leaf(ipft) - 1.0/c2n_storage)

!-----!
!-----!
!
! Deduct the leaf drop from the carbon balance.
!-----!
cpatch%cb (13,ico) = cpatch%cb (13,ico)
- cpatch%leaf_drop (ico)
cpatch%cb_lightmax(13,ico) = cpatch%cb_lightmax(13,ico)
- cpatch%leaf_drop (ico)
cpatch%cb_moistmax(13,ico) = cpatch%cb_moistmax(13,ico)
- cpatch%leaf_drop (ico)
cpatch%cb_mlmax(13,ico) = cpatch%cb_mlmax (13,ico)
- cpatch%leaf_drop (ico)

!-----!
elseif (cpatch%phenology_status(ico) /= 0) then

!-----!
! Elongation factor could increase, but we first check whether it !
! is safe to do so based on the phenology status.

!-----!
select case(cpatch%phenology_status(ico))
case (1)
!----- Leaves were already growing, keep growing. -----!
cpatch%elongf (ico) = elongf_try

!-----!
case (-1,-2)

```

```

!-----!
!           !   Leaves were dropping or gone, we first check that conditions
!
!           !   are really improving before we turn on leaf production.           !
!-----!

elongf_grow= min(1.0,max(elongf_flush,cpatch%elongf(ico)+0.02))
if (elongf_try>= elongf_grow) then
    cpatch%elongf      (ico) = elongf_try
    cpatch%phenology_status(ico) = 1
end if

!-----!

end select

!-----!

!           !   Conditions are slightly more humid.  Let them grow.
!
!-----!

if (.not. veget_dyn_on) then
    cpatch%bleaf      (ico) = bl_max
    cpatch%balive     (ico) = cpatch%balive(ico) - delta_bleaf
end if

!-----!

end if
!-----!
end select

!-----!

!----- Update LAI, WAI, and CAI accordingly.
!-----!
call area_indices(cpatch, ico)

!-----!

!----- Update above-ground biomass. -----!
cpatch%agb(ico) = ed_biomass(cpatch, ico)

```

```

!-----!
!       !   The leaf biomass of the cohort has changed, update the vegetation energy
!
!       ! using a constant temperature assumption.
!
!-----!

old_leaf_hcap      = cpatch%leaf_hcap(ico)
old_wood_hcap      = cpatch%wood_hcap(ico)
call
calc_veg_hcap(cpatch%bleaf(ico),cpatch%bdead(ico),cpatch%bsapwooda(ico)  &
              ,cpatch%bbark(ico),cpatch%nplant(ico),cpatch%pft(ico)
&
              ,cpatch%leaf_hcap(ico),cpatch%wood_hcap(ico) )
call update_veg_energy_cweh(csite,ipa,ico,old_leaf_hcap,old_wood_hcap)
call is_resolvable(csite,ipa,ico)

!-----!

!----- Printing some debugging stuff if the code is set for it. -----!
if (printphen) then
  ipft=cpatch%pft(ico)
  if (first_time(ipft)) then
    first_time(ipft) = .false.
    write (unit=40+ipft,fmt='(a10,6(1x,a12))') &
      & ' TIME', ' PATCH', ' COHORT', ' NPLANT'
&
      & ' LEAF_DROP', ' PAW_AVG', ' ELONGF'
    end if

    write (unit=40+ipft,fmt='(2(i2.2,a1),i4.4,2(1x,i12),5(1x,es12.5))') &
      current_time%month,'/',current_time%date,'/',current_time%year,ipa,ico&
      ,cpatch%nplant(ico),cpatch%leaf_drop(ico),cpatch%paw_avg(ico)
&
      ,cpatch%elongf(ico)
    end if
  end do cohortloop
end do patchloop
return
end subroutine update_phenology

!=====!

```