

제 5 장

탄소순환과 기타 생지화학순환

138	5.1. 서론
138	5.2. 탄소순환
153	5.3. 기타 생지화학순환
155	5.4. 결론
156	5.5. 참고문헌



제 5 장 탄소순환과 기타 생지화학순환



5.1. 서론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 탄소순환은 기후 시스템의 중추적 구성요소로서 기후변화와 관련된 다양한 규모의 복합적 강제력, 비선형 반응, 되먹임 등을 통합할 뿐 아니라 다른 생지화학순환과 연결되어 생태계의 건강과 오염 및 대기질에 심각한 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다.

본 장에 요약된 내용은 「한국 기후변화 평가보고서 2014」의 제5장 ‘탄소순환과 기타 생지화학순환’에서 다루어진 내용을 보완한 것이다. 주로 기후 시스템에 대한 주요 생지화학적 되먹임의 중요성과 추세 및 이해수준의 평가를 목적으로 그동안 국내에서 추가로 이루어진 연구들을 중심으로 한반도의 기후 시스템과 생물리 및 생지화학과정의 이해수준에 대하여 요약하였다.

본 장은 크게 네 부분으로 (1) 서론, (2) 탄소순환, (3) 기타 생지화학순환, (4) 결론으로 구성되어 있다. 탄소순환은 관측과 모델링 및 관측 융합으로 나누었고, 관측의 경우 국내 육상 생태계에서의 연구를 중심으로, 산림생태계의 탄소순환 관측 및 농업생태계의 탄소순환 관측 결과를 보완하였다. 또한 새롭게 담수생태계와 극지생태계에서의 탄소순환 관측 연구 결과를 추가하였다. 탄소순환 모델링 및 관측 융합에서는 1) 관측자료 기반의 모델링과 2) 아시아 탄소추적시스템으로 나누어 요약하였다. 기타 생지화학순환은 1) 질소순환과 2) 단수명 기후변화유발물질순환으로 나누어 요약하였다.

5.2. 탄소순환

5.2.1. 탄소순환 관측

5.2.1.1. 산림생태계 탄소순환

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 따르면, 국내 산림은 1970~80년대에 대규모 녹화가 이루어진 이후 매년 감소하여 현재 국토 면적의 63%를 차지하고 있다. 이중 40% 이상이 5~6영급에 이르렀고, 목재의 자급률 증가를 위한 벌채량이 급격히 증가하고 있어서 자연적인 탄소순환보다는 인간의 간섭에 의한 영향이 커지고 있다고 보고되었다.

이에 따라 2014년 평가보고서 이후로 생물량과 상대생장식에 대한 연구, 특히 제5차 국가산림자원조사 자료에서 나온 목편 자료를 이용한 연구가 증가하였으며, 벌채 이후의 산림의 갱신과 천이가 일어나는 과정에서 초기의 생장특성과 산림탄소 순환에 대한 연구, 중장령림의 관리 방안에 따른 탄소축적량의 변화에 대한 연구, 또한 소나무 재선충병, 가뭄과 같은 교란이 산림탄소에 미치는 영향에 대한 연구가 증가하였다(예, Lee et al., 2019). 이러한 연구들을 지상부 생물량, 토양 탄소, 탄소 수지로 나누어 요약하였다.

지상부 생물량: 2006년부터 2010년까지 시행된 제5차 국가산림자원조사(NFI)의 목편 자료를 기반으로 한 연구가 활발히 진행되었다. 임종환 등(2016)은 잣나무와 일본잎갈나무의 지역별 생장특성을 구명하고 군집별 생장패턴의

변화를 예측하였으며, 2017년에는 소나무의 연륜생장 목편 자료에 근거하여 연륜생장과 기후인자와의 관계를 구명하고, RCP 8.5가 실현될 경우, 2050년 이후에는 소나무의 연륜생장이 크게 감소할 것으로 예측하였다. 문가현 등(2018)은 진계생장 추정식을 개발하였으며, 서연옥 등(2017)은 국가 산림자원조사 자료와 수치임상도를 활용하여 전북 무주 지역 리기다소나무림의 공간분포도를 작성한 결과, 탄소 저장량은 평균 $58.2 \text{ ton C ha}^{-1}$ 였다. 김경민 등(2015)은 국가산림자원조사, 임상도 및 인공영상을 활용한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 충청남도의 격자별 산림 탄소저장량 정보를 가진 산림탄소지도를 제작하였고, 인공영상보다는 임상도를 사용하는 것이 임분 구조가 복잡한 우리나라에 더 적절함을 보여 주었다. 이외에도, Kim et al. (2017)은 소나무와 곰솔의 흉고 직경과 지상부 0.2m의 직경을 이용해서 수간, 수피, 가지, 잎, 그리고 뿌리의 생물량, 탄소 및 질소 농도를 예측하는 상대생장식을 개발하였고, 표정기와 손영모(2017)는 소나무림의 임령-생물량 모형을 개발하였다.

벌채 후 갱신 또는 조림 이후 산림관리로 인한 산림 탄소의 변화에 대한 연구로서 이종열 등(2015)은 메타 분석을 통해, 간벌에 의한 직경 생장량이 평균 39% 증가하였으나 임목 탄소저장량은 31% 감소함을 보였고, 간벌 강도 및 회복 시간(간벌 후 시간의 경과)과 상관관계를 이용한 회귀식을 개발하였다. 한편, 갱신된 8년생 소나무림의 간벌은 임분 내 개체목의 근원 직경과 탄소량을 증가시켰을 뿐 아니라, 1년 후 간벌재로 반출된 탄소량의 86%를 회복한 것으로 나타났다(송수진 등, 2016). 권기범 등(2016)은 거리독립 임분생장 예측 시뮬레이터를 이용하여 간벌사업과 지위지수가 임분의 생장패턴과 탄소고정에 영향을 미침을 보였다. 상록활엽수의 경우, 정수영 등(2015)은 붉가시나무림의 속아베기 강도 처리에 따른 임분의 생장반응 특성을 보고하였고, Kim et al. (2019a)은, 동백나무, 구실잣밤나무, 붉가시나무, 종가시나무, 후박나무, 참식나무의 상대생장식과 탄소확장계수를 개발하였다.

토양 탄소: Cha et al. (2019)은 595개 임분에서 식생을 소나무와 기타 침엽수, 참나무류와 기타 활엽수의 네 수종으로 나누어 임분의 수종이 임상과 토양 탄소에 미치는 영향을 분석하였고, 수종에 따라 차이가 있음을 보였다. 임상의

탄소 함유량은 참나무림과 기타활엽수림이 각각 5.39 와 5.41 Mg C ha^{-1} 였고 소나무림이 7.12 Mg C ha^{-1} 로 가장 많았다. 반면 0-0.3m 토양의 경우, 참나무와 기타활엽수림의 탄소 함유량이 모두 66 Mg C ha^{-1} 로 높았고 소나무림의 함유량은 49.50 Mg C ha^{-1} 였다. 전체 토양 탄소(낙엽층과 토양의 합)는 활엽수림에서 가장 높았고, 기타침엽수림에서 가장 낮았으며, 수종이 토양 탄소에 미치는 영향은 임령이 3영급 이상일 때 명확히 나타났다. 유기물 층의 토양탄소와 양분의 농도는 토지 피복과 수종에 따라 달랐고 참나무림이 탄소 농도가 높았다(Han et al., 2017, 2019).

세 개의 인접한 동령(53년)의 낙엽송, 소나무, 곰솔 임분에서는 토양 탄소 방출량이 곰솔 임분이 가장 높았고, 소나무 그리고 낙엽송의 순으로 나타났다. 탄소 방출량은 토양 온도에 지수적으로 증가하였고, 토양 pH와는 음의 상관을 보였으나, 토양 수분이나 토양 유기물과는 유의한 상관을 보이지 않았다(Kim et al., 2017). Han et al. (2016)의 소형 rhizotron을 이용한 75년 된 소나무림 연구 결과에 따르면, 세균 생산량과 세균 고사율이 각각 3200.2와 2271.5 $\text{kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 였고, 전자의 경우 순일차생산량의 17%를 차지했다. 세균의 발생량은 여름에, 고사율은 가을에 가장 높았는데, 모두 토양 온도의 변화와 상관관계가 높았다.

이종열 등(2015)은 간벌이 토양 탄소에 미치는 영향에 대한 메타 분석에서 간벌에 의해 토양탄소 저장량이 약 13% 증가하였으나 고사목과 낙엽층 탄소 저장량은 변화가 없음을 보였다. Kim et al. (2015)에 따르면, 간벌 약 40개월 후 0.1-0.2 m와 0.2-0.3 m 깊이의 토양에서, 간벌하지 않은 대조구에 비하여, 15%와 30% 간벌구에서 탄소 농도가 유의하게 증가했으나 임상에는 차이가 없었다. 교환가능한 염기성 양이온의 경우, 0-0.1m 깊이의 토양에서 30% 간벌구가 대조구에 비해 간벌초기에 유의하게 적었다. 최은진 등 (2016)은 소나무재선충병이 발생한 곰솔임분의 간벌 처리구를 대상으로 연 평균 토양 CO_2 방출량을 측정한 결과, 약도구 0.58 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 강도구 0.49 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 대조구 0.45 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 였으며, 토양 CO_2 방출량은 토양온도와 지수함수 관계를 보였으나 토양수분이나 토양pH와는 상관관계가 없었다. Q_{10} 값은 약도구 3.40, 강도구 3.20, 대조구 3.06으로 약도구가 가장 크게 나타나 소나무재선충병 발생 곰솔임분의 간벌처리는 토양온도 상승과 함께 토양 CO_2

방출에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 송수진 등(2016)의 벌채 후 8년생 소나무림의 간벌에 따른 토양 CO₂ 발생량, 낙엽 및 뿌리의 분해율 조사에 따르면, 간벌을 통한 식생의 제거는 연간 토양 CO₂ 발생량을 증가시키며, 토양온도와 양의 상관관계가 있으나 토양수분과는 뚜렷한 관계가 나타나지 않았다. Kim et al. (2018c)도 소나무림의 간벌로 인해 토양 미생물의 양이 증가하고 토양탄소와 질소도 증가하는 것을 확인하였다. 토양의 CO₂ 농도가 높아진 것을 가상한 김현준 등(2018)의 실험에서는 CO₂ 농도가 높을수록 근원 경이 증가하였고, 지하부로의 탄소 분배량이 촉진되었다.

Vicente-Vicente et al. (2019)은 산림관리 사업이 토양의 탄소 동화와 수자원 공급에 미치는 영향을 연구하였다. 나무의 벌기령을 80년에서 40년으로 줄이는 것은 생물량 생산량이 높은 임분에서만 가능하고, 생산량이 적은 임분에서는 토양 탄소의 급격한 유실을 야기할 것으로 나타났다. 그러나 산림의 종다양성이 높을 경우 토양성질의 개량으로 인해 탄소의 유실량이 감소하는 것으로 예측되었다.

탄소 수지: 산림의 탄소순환에 있어 고사목의 영향에 관하여 Yoon et al. (2015)은 광릉과 점봉산 소나무 고사목의 호흡량을 이용하여 고사목의 분해속도와 산림의 탄소수지에 미치는 영향을 분석하였다. 광릉은 소나무 수간, 가지, 활엽수 고사목의 경우, 각각 29.54, 3.90, and 158.95 g C kg⁻¹ yr⁻¹ 였고, 점봉산의 경우 소나무 수간과 가지가 각각 49.09와 14.55 g C kg⁻¹ yr⁻¹ 였다. 고사목의 부후속도를 결정하는 주요인자는 목재의 온도와 습도 그리고 수종이었다. 광릉 고사목의 호흡은 전체 타가호흡의 ~4%, 고사목 부패의 54%를 차지한 반면, 점봉산의 경우 고사목의 호흡이 부패와 거의 동일하였으며, 생태계 생산량에서 차지하는 비율은 미미하였다. An et al. (2017)은 광릉 활엽수림과 침엽수림의 낙엽량과 세균의 생물량 및 회전율을 조사한 결과 연도별 낙엽량의 차이는 없었으나, 세균 발생량의 차이는 건조한 해에 더 높은 것으로 나타났다. 임분별로는 침엽수림의 낙엽량이 활엽수림보다 높았으나, 세균의 생물량 생산에는 차이가 없었으며 전체 순일차생산량의 18~44%를 차지하였다. 회전율은 침엽수림이 활엽수림보다 높았다. 가지의 분해속도는 리그닌의 양과 반비례하고, 섬유소의 양과는 비례하는 것으로 보고되었다(Cha et al., 2017). 고사목의

함수율은 수분이 미생물의 활성도를 높여 호흡속도에 큰 영향을 미쳤다(이민규 등, 2019).

온난화로 인한 탄소순환의 변화를 보기 위해, 안지애 등(2016)은 적외선 등을 이용한 2.7°C 온난화 처리 하에 생육한 물푸레나무, 느티나무, 거제수나무, 굴참나무 중, 굴참나무를 제외한 다른 수종에서 기공전도도와 증산속도가 온난화 처리에 의해 감소하였고, 엽록소 함량은 증가하였으나, 순 광합성률은 모든 수종에서 통계적으로 유의한 변화를 보이지 않았다. 한승현 등(2018)도 33개월생 소나무 묘목을 대상으로 기온이 3°C 높은 인위적 온난화 처리와 강수 조절(±30%)에 의한 계절별 세균 생산량과 세균 고사율의 변화를 분석한 결과, 온난화 처리는 세균 생산량 및 고사율에 통계적으로 유의한 영향을 주지 못하였다. 강수 조절의 경우, 세균 생산량에만 유의한 영향을 주어 강수 증가 처리구에서 16% 감소하였고, 건조 처리구에서 세균의 발생량이 29% 증가하였다.

국가산림자원조사를 이용하여 손영모 등(2017)은 5차와 6차 자료를 비교분석한 결과, 전국적으로 활용될 수 있는 임상별 고사율(고사 입목의 재적량, %) 추정식을 개발하였고, Choi and An (2016)은 천연 활엽수림의 성장모형을 개발하여 활엽수림의 식생 동태를 비교적 정확하게 예측하였다.

기후변화로 점차 취약해지고 있는 아고산 산림생태계의 변화 및 쇠퇴 상황을 파악하기 위해 시계열 Landsat 위성 영상을 분석한 김은숙 등(2019)에 따르면, 1990년대 중반 이후 20년 동안 전국 아고산 지역 침엽수림의 면적이 약 25% 감소한 것으로 나타났다. 특히, 설악산, 백운산-함백산-장산, 지리산, 한라산 등에서 많은 변화가 있었다. 조선희 등(2015)은 백운산 내 구상나무 서식지를 조사하여 기후변화 시나리오 RCP 8.5를 적용하여 미래의 잠재적 분포를 분석한 결과 2050년에는 상봉 주변을 중심으로 20 ha까지 서식지 면적이 감소되고, 2080년에는 서식지가 사라질 것으로 예측하였다.

우리나라의 산림녹화가 탄소순환에 미친 영향을 보기 위해 Kim et al. (2019c)은 임상도, 국가산림자원조사, 기상자료 및 모형을 이용하여 1961년부터 2014년 사이의 탄소 축적량을 모의하였다. 탄소 축적량은 1961년 6.65 Tg C에서 2014년 476.21 Tg C로 증가했으나, 산림의 노령림화로 인해 앞으로는 축적량의 증가가 감소할 것으로 예측되었다.

1992년 이후, 우리나라 전체 산림의 탄소 축적은 매년 11.8 Tg C 씩 증가하여, 1992년 509.7 Tg C에서 2034년 1007.3 Tg C로 증가하는 것으로 예측하였다. 토양 유기물의 경우 그 변화가 373.9 Tg C에서 369.2 Tg C로 큰 차이가 없을 것으로 예측하였다. 그러나 그 이후 백년간 벌채량의 증가로 약 200 Tg C가 목재로 사용되면서 산림 탄소의 축적량이 감소할 것으로 예상된다.

교란으로 인한 탄소와 양분 순환의 변화에 관한 Kim et al. (2019b)의 연구에 따르면, 소나무 재선충병의 강도와 낙엽의 탄소와 질소 농도에 상관관계가 있어서, 재선충병의 강도가 약할수록, 낙엽으로 인한 질소와 탄소의 유입이 적어지는 것으로 나타났다. 잎의 분해 속도에는 피해 정도에 따른 차이가 없었으나, 낙지의 분해 속도는 재선충병 강도가 강한 지역에서 늦은 것으로 나타났다. Yang et al. (2019)은 노령림인 광릉수목원의 활엽수림에서 2006년부터 2018년까지 에디공분산(eddy covariance, 난류에 의해 수송되는 양을 직접 관측) 방법으로 관측된 CO₂ 플럭스 자료를 기반으로, 균형을 이루고 있는 총일차생산량(GPP)과 생태계 호흡량(RE)이 기후변화에 따라 민감한 경년변동을 보이며 탄소 흡원에서 탄소 중립 또는 발원으로 바뀔 수 있음을 보였다. 또한 이러한 변화에 휴면기의 생태계 호흡이 중요한 영향을 미치기 때문에 휴면기/동절기의 산림 토양 탄소 및 낙엽 관리와 모니터링이 필요함을 지적하였다. 김성준 등 (2016)은 흰개미의 활동으로 인한 토양 유기탄소 농도 변화, 메탄 발생 및 유기물 분해 등을 조절하여 탄소 순환에 미치는 영향에 대한 연구에서, 흰개미 집이 일반 토양에 비하여 평균 1.8배의 유기탄소를 함유하며, 메탄의 점 발생원이며, 흰개미의 섭식 활동이 고사목의 부피 대비 표면적의 비율을 증가시켜 고사목의 분해를 가속화시켜, 온대 산림의 탄소 순환에서 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였다(e.g., Kim et al., 2018b; Kim et al., 2019d).

5.2.1.2. 농업생태계 탄소순환

『한국기후변화평가보고서 2014』에서는 온실가스 배출량을 평가하기 위한 국내 고유의 배출계수 개발의 필요성, 이와 관련한 버를 포함한 농작물 생산의 전과정 평가, 벼-보리

이모작 논 생태계의 단기 플럭스 관측 사례, 메탄 배출계수 개발 및 관리방안에 따른 온실가스 저감 사례 등이 보고되었다.

농업생태계-대기 간 탄소순환 관측은 주로 챔버(상자 내 시간 간격에 따른 농도 변화량 관측)법과 에디공분산법이 사용된다. 주옥정 등(2018)은 농경지 온실가스 배출 산정을 위해 챔버법이 사용된 사례들을 고찰하여, 측정값의 시공간적 비균질성, 측정 시 발생하는 교란, 자료의 품질관리 및 불확도의 정량화 등 국내 챔버 관측의 문제점과 개선방향을 논의하였다.

에디공분산법은 측정기술과 더불어 자료처리 기술이 함께 발전되고 있다. 메탄은 농업분야 온실가스 배출량의 32%로서 가장 큰 비중을 차지한다(온실가스 종합정보센터, 2016). 파장 변조 분광법 기반의 개회로(open-path) 메탄 기체 분석기의 개발과 보급으로 논에서의 메탄 플럭스 관측이 늘어나고 있다. 강남구 등(2015)은 메탄 기체분석기의 분광 보정을 포함한 품질관리방법을 제시, 효과를 평가하였고, 강민석 등(2018)은 품질관리 이후 결측된 메탄 플럭스 자료를 메우는 주변 분포 표본 추출법을 제안하였는데, 논의 메탄방출을 결정짓는 주요 조절 인자로서 메탄의 생성과 산화 및 수송에 관여하는 생태계온도(기온, 지온), 수위 및 GPP를 고려하였다.

산림의 경우와 마찬가지로 농경지에서 CO₂ 플럭스의 장기간 관측 자료가 확보되면서 경년변동 분석 연구가 증가하고 있다. Indrawati et al. (2018)은 2003년부터 2015년까지 해남 농경지에서 벼의 생장기간 동안에 관측된 탄소, 물, 에너지 플럭스의 시계열 자료를 분석하여 GPP, 물이용 효율(WUE), 탄소흡수효율(CUE), 빛이용효율(LUE) 등의 지표들을 평가하였다. 해당기간에 재배된 네 가지 벼 품종(동진1호, 남평, 온누리, 새누리)별로 지표들이 다른 값들(GPP: 800-944g C m⁻²; WUE: 1.91-2.80 g C (kg H₂O)⁻¹; CUE: 1.06-1.34; LUE: 0.99-1.55 g C MJ⁻¹)을 보였다. 이를 분석하여, 기후스마트농업(생산성 및 소득 증대, 기후변화 적응, 온실가스 배출 완화)의 관점에서 동진1호가 우수한 품종으로 평가됐으나, 현실적으로 농부들은 해충저항성이 높은 새누리를 재배하고 있음을 지적하였다.

기존의 농경지 CO₂ 배출 연구들이 대부분 재배기간에 집중한 반면, 최근에는 휴경기간에 대한 관측이 늘어나고 있다. 이선일 등(2018)은 동절기 휴경기간 녹비재배 농경지 토양에서 CO₂ 및 N₂O의 배출특성을 보고하였다. 휴경기간의

CO₂와 N₂O의 일평균 배출량(1.73 g CO₂ m⁻² d⁻¹, 0.62 mg N₂O m⁻² d⁻¹)은 경작기간의 일평균 배출량의 28%에 해당하여, 휴경기간에 배출되는 양의 포함 여부에 따라 전국 온실가스 배출량이 크게 달라질 수 있음을 시사한다.

농경지는 주로 CO₂ 중립으로 인식되고 있으나, 심교문 등(2016a)은 사과 과수원과 같은 임목의 농업생태계의 경우 CO₂ 흡원으로 기능함을 보고하였다. 국내 사과원 생태계에서 에디공분산법으로 관측하여 연적산된 CO₂ 순생태계교환량(NEE)은 -397 g C m⁻²로 유사한 환경조건에서 관측된 이탈리아의 사과원 생태계의 NEE와 비슷하다.

다년간 논에서 관측된 메탄 플럭스 자료가 확보되면서 메탄 방출 기작에 대한 이해도 증진되고 있다. Kim et al. (2016)은 김제 이모작지에서 2011년부터 4년간 관측된 메탄의 계절변동과 경년변동 분석을 바탕으로 중간낙수와 장마의 효과를 함께 고려한 개선된 메탄 배출 산정 방법을 제안하였다. 중간낙수(뿌리 활력을 증대시키고 무효분얼을 막고자 모내기 35일 정도 후에 논 물 2주간 정도 배수) 기간에는 혐기성 토양이 호기성 조건으로 바뀌면서 메탄 방출량이 급격하게 감소하게 되고, 이후 다시 관개를 하더라도 이전만큼 메탄 방출이 일어나지 않았다. 현재 사용되고 있는 메탄 방출계수는 이 점을 고려하여 제안된 것인데, Kim et al. (2016)은 중간낙수 기간과 장마가 겹치게 되어 이러한 효과가 감소함을 지적하고, 4년간 관측된 중간낙수 전후의 메탄 방출량, 중간낙수기간, 해당기간에 내린 강수량 자료를 기반으로 유효한 중간낙수기간을 산정하는 경험식을 제시하였고, 이를 고려하지 않을 경우 메탄 방출이 크게 과소평가됨을 보였다.

메탄 플럭스 관측지가 김제 논뿐만 아니라 철원과 해남의 논으로 확장되면서 기후, 경작방법, 품종 등에 따라 달라지는 메탄 방출 특성에 대해 이해할 수 있게 되었다(차세대도시·농림융합기상사업단, 2017). 해남 논 관측지는 한반도 최남단, 간척지에 위치하며, 모내기가 아닌 무논점파법이 사용되어 재배 방법에 따른 메탄 방출량을 관측하기 위해 구축되었다(이승훈 등, 2018). 철원 논 관측지는 국내 최북단에 위치한 조생종 오대 품종이 재배된다(Yang et al., 2018). 김제, 해남, 철원에서 관측된 연간 메탄 방출량의 범위는 19.0~22.8 g C m⁻² yr⁻¹로서, 크기와 계절변동성이 관측지마다 크게 달랐다(그림 5.1). 중간낙수 기간에는 모든 관측지에서 메탄 방출이

감소되었으나, 중간낙수 후에도 메탄 방출량이 지속적으로 줄어드는 현상은 관측지에 따라 다르게 나타났다.

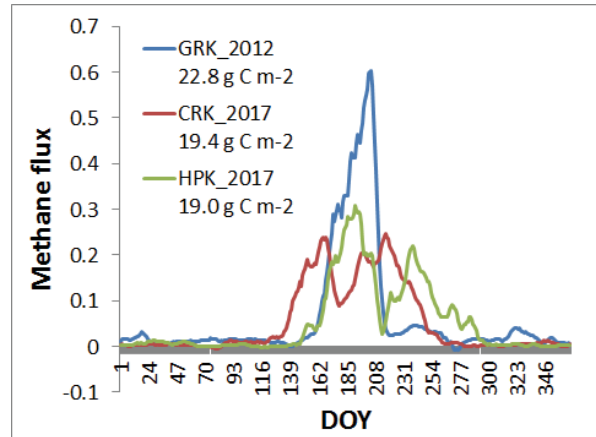


그림 5.1. 김제 논(GRK), 철원 논(CRK), 해남 논(HPK)에서 에디공분산법으로 관측된 메탄 플럭스의 계절변동. 관측지명 옆의 숫자는 관측한 해, 아래 숫자는 연적산 메탄방출량을 나타냄(자료출처: Kim et al., 2016; 차세대도시·농림융합기상사업단, 2017).

농경지가 CO₂를 비롯한 온실가스의 흡원 또는 발원인지를 평가하기 위해서는 비경작기간을 포함한 1년 전체를 고려해야 하며, 온실기체뿐만 아니라 수확을 통해 농경지 외부로 이동되어 소비되는 양까지 함께 고려해야 한다. 농업생태계가 일반적으로 CO₂ 중립으로 인식되는 이유는 수확물이 소비 또는 분해되어 다시 대기 중으로 방출되기 때문이다. 심교문 등(2015)은 김제 보리-벼 이모작지에서 2013년 1년간 에디공분산법으로 관측된 CO₂ 플럭스, 챔버법으로 관측된 메탄 플럭스와 수확량을 보고하였는데, 각각 -433, 18, 600 g C m⁻² yr⁻¹였고, 그 총합인 순생물상교환량은 184.7 g C m⁻² yr⁻¹로서 김제의 보리-벼 이모작지는 탄소의 발원임을 보여주었다. 심교문 등(2016b)은 같은 관측지의 2014년 자료와 벼 단작지 같은 해 자료를 서로 비교하였는데, 이모작지/단작지의 CO₂ 및 메탄 플럭스는 각각 -587.5/-436.8, 18.6/16.0 g C m⁻² yr⁻¹로 벼-보리 이모작의 논이 벼 단작의 논보다 CO₂는 더 많이 흡수하였지만 동시에 더 강력한 온실가스인 메탄을 더 많이 방출하였고, 수확량을 고려한 전 과정 평가는 보고되지 않았다. 국내에서 중간낙수를 포함한 간헐적 관개를 일반적으로 수행하고 간헐적 관개가 아산화질소

방출을 증가시킴(Kritee et al., 2018)을 감안할 때, 논은 온실가스의 발원으로 평가될 수 있으나, 정확한 평가와 완화 전략을 위해서는 전 과정 평가에 필요한 지속적인 관측 자료의 구축이 절실히 요구된다.

최근에 들어 미국 NASA의 OCO-2, OCO-3, GeoCarb, 유럽 ESA의 FLEX 미션 등의 엽록소 형광 기반의 SiF(Sun-induced chlorophyll fluorescence) 탐지와 관련하여, 국내에서는 철원의 KoFlux 논 관측지에서 2015년부터 SiF 센서를 설치하여 자동으로 연속 관측을 수행해 오고 있다. Yang et al. (2018)에 따르면, 철원 논에서 관측된 SiF는 광합성보다는 군락에 의해 흡수된 광합성유효복사(APAR)와 더 높은 상관관계를 보였는데, 이러한 결과는 SiF를 통해 광합성을 추정하려면 광이용효율을 알아야 함을 시사한다. 또한 광합성과 SiF의 상관관계가 생물계절, 상대습도, 산란복사량의 비율 등에 따라 달라짐을 보고하였다.

5.2.1.3. 담수생태계 탄소순환

『한국 기후변화 평가보고서 2014』에서는 강수발생시 유출을 통한 산림생태계로부터의 탄소 유출에 관한 연구 결과가 일부 보고되었으나 별도로 다루어지지 않았던 담수생태계의 탄소순환을 본 평가보고서에 새롭게 추가하였다.

하천과 호소의 탄소는 기원에 따라 무기탄소 및 유기탄소, 성상에 따라 용존 및 입자상 탄소로 구분된다. 이에 따라 담수생태계의 탄소는 용존무기탄소(DIC: dissolved inorganic carbon), 입자상무기탄소(PIC: particulate inorganic carbon), 용존 유기탄소(DOC: dissolved organic carbon) 및 입자상유기탄소(POC: particulate organic carbon)로 구분된다. 이러한 네 탄소 성분이 전 세계의 하천을 통해 바다로 유입되는 양은 연간 0.8~1.5 Pg C로 추정된다(오능환, 2016; Li et al., 2017).

전지구적 차원에서 하천과 호소의 온실가스 배출량을 추정한 최신 결과에 따르면, 다양한 육수(inland waters) 환경에서 연간 배출되는 CO₂(0.62~3.0 Pg CO₂-C; Cole et al., 2007; Raymond et al., 2013; Ward et al., 2018)와 CH₄(0.65 Pg CO₂ eq-C; Bastviken et al., 2011)의 총합이 인위적으로 배출된 CO₂ (Le Quéré et al., 2018; 2016년 기준 11.2 Pg C yr⁻¹) 중 육상생태계에 격리되는 탄소량(Le Quéré

et al., 2018; 2016년 기준 2.7 ± 1.0 Pg C)에 육박하거나 상회한다. 이러한 배출량 추정값은 아시아와 아프리카의 실측 자료의 부족으로 인해 예측 불확실성이 매우 높고(Raymond et al., 2013), 오염이나 댐 같은 인위적 교란의 영향을 제대로 고려하지 않았다(Regnier et al., 2013; Park et al., 2018).

한국 담수생태계의 탄소순환과 온실가스 배출은 이전 보고서에서 논의되지 않았다. 이 보고서에서는 2014년 이후에 발표된 연구결과를 하천과 호소 환경으로 구분하여 정리하였고, 댐과 수질오염 등의 인위적인 교란이 담수 탄소순환에 초래하는 영향을 요약하였다.

하천 탄소 플럭스: 국내 주요 하천을 대상으로 탄소 플럭스를 측정하거나 추정한 연구는 많지 않다. 오능환(2016)은 소유역에서 측정한 단위 면적 당 유기탄소 유출량 자료와 5대강의 유역 총면적 및 총 유량값을 이용하여 5대강을 통한 총유기탄소의 연간 유출량을 185 Gg C로 추정하였다. 박형근과 옥기영(2017)은 환경부 수질측정망의 TOC 측정 자료에 기초하여 4대강의 연간 TOC 유출량을 28.5 Gg C로 추정하였고, 한강이 18.0 Gg C로 가장 높고, 금강(5.9 Gg C), 영산강(2.6 Gg C), 섬진강(2.0 Gg C) 순이었다. 오능환(2016)이 추정한 5대강의 TOC 유출량과 박형근과 옥기영(2017)의 4대강 TOC 유출량은 각각 우리나라 산림의 평균 순생태계 생산량(NEP)인 3,510 Gg C(Yoo et al., 2013)의 5%와 0.8%에 해당한다.

산림 소유역과 대형 하천에서 실시한 현장 조사에 따르면, DOC와 POC 모두 강우량과 강도에 비례하여 유출량이 크게 증가하는 경향을 보였다(Jung et al., 2014; Shin et al., 2016). 특히 POC의 경우 일강우량이 100mm를 초과하는 집중호우 시 유출량이 급격하게 증가하여(Jung et al., 2014), 향후 기후 변화에 따른 집중호우의 강도와 빈도 변화에 따라 하천의 유기탄소 플럭스가 크게 증가할 수 있음을 시사한다. 강우 중이나 직후 하천의 유기물은 육상기원 부식질 성분의 비율이 크게 증가하여 용존유기물 중 생분해가 가능한 DOC의 비율이 감소하거나 POC와 DOC 성분 간의 전환이 발생하는 등, 강우에 의한 유기물 유출량과 성분 변화가 하천과 호소 및 해양의 탄소순환에 광범위한 영향을 초래할 수 있다(Jung et al., 2014, 2015; Shin et al., 2016).

하천 DIC는 HCO₃⁻, CO₃²⁻, CO₂로 이루어지나, 일반적인

pH 범위($6 < \text{pH} < 8$)에서는 암석의 풍화에 의해 하천으로 유입되는 HCO_3^- 가 가장 큰 부분을 차지한다. 2000년대 초반까지 한국 하천의 DIC 연구는 주로 한강을 중심으로 HCO_3^- 농도나 DIC의 탄소안정동위원소비를 측정한 지화학적인 연구가 대부분이었다(Ryu et al., 2008; Shin et al., 2011). 최근 5대강에서 측정한 DIC 농도에 기초한 한국 하천의 DIC 연간 유출량은 720 Gg C로 추정된다(오농환, 2016). 이를 위의 TOC 유출량 추정값(185 Gg C)과 합치면 연간 총 905 Gg C로서, 산림 NEP 추정값(3,510 Gg C)의 26%가 국내 하천을 통해 바다로 유출됨을 의미한다. 이러한 추정값의 정확성을 제고하기 위해서는 시공간적 변이를 고려한 보다 많은 현장 실측 조사가 필요하다.

하천 DIC 중 CO_2 에 대해서는 주로 pH와 염기도 같은 2차 자료를 이용해 농도를 추정하였으나(Shin et al., 2011), 최근 한강 유역에서 실시된 현장 연구에서 하천의 CO_2 분압(pCO_2)이 하천 구간 및 주변 유역 특성에 따라 큰 시공간적 변이를 나타냈다(Yoon et al., 2017; Jin et al., 2018). 북한강의 경우 소양댐, 의암댐 및 청평댐 같은 대규모 댐에 의한 저류화로 인해 식물성플랑크톤에 의한 CO_2 흡수가 증가함으로써 pCO_2 가 상류나 하류에 비해 비교적 낮은 100~760 μatm 범위의 값이 관측되었다. 반면에 수도권을 관통하는 한강 하류와 주요 지류의 pCO_2 와 CH_4 농도는 일부 지점에서 각각 12,000 μatm 와 650 nmol L^{-1} 에 육박하는 등 국지적으로 매우 높은 값이 측정되었다(Yoon et al., 2017; Jin et al., 2018). 특히 하수처리장 방류수가 다량의 온실가스를 유입시키는 지점에서 두 가스의 농도가 모두 높게 나타났으며, pCO_2 의 경우에는 방류수 속의 유기물이 하류의 이동 과정 중에 분해되어 값이 증가하거나 조류의 CO_2 흡수가 활발한 구간에서는 오히려 값이 감소하는 등 복잡한 양상을 보였다(Yoon et al., 2017). 금강의 3개 도시 지천에서 DIC의 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)를 분석한 결과, 비교적 건조한 시기인 12~5월 중에 세제 같은 생활하수 중의 인위적으로 유래한 탄소 성분이 하천 DIC의 주요 배출원임을 보여주었다(Shin et al., 2015). 세계적으로 도시화에 따른 하천의 유기오염이 증가하고 있다. 보다 정확한 하천 탄소수지 예측을 위해서는 한강이나 금강처럼 하수처리장 방류수의 영향을 크게 받는 도시 하천의 유기탄소 특성과 온실가스 배출에 대한 보다 많은 관측과 분석이 필요하다.

호소 탄소 플럭스: 지난 20여 년간 전세계적으로 호수, 연못 및 저수지의 CO_2 와 CH_4 배출에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다(Cole et al., 2007; Bastviken et al., 2011; Maavara et al., 2017), 한국에도 많은 저수지가 있지만 이를 대상으로 한 탄소순환 연구는 일차생산과 유기탄소 플럭스 측정에 국한되고(Kim et al., 2016), 온실가스 배출에 대한 기초 조사가 제대로 이루어지지 않았다. 최근 북한강의 일부 저류화 구간에서 실시된 3종 온실가스 관측(Jin et al., 2018)이나 소양호의 CH_4 발생에 대한 현장 관측(김기용 외, 2018)을 통해 저수지의 온실가스 배출량 추정을 위한 추가 연구의 필요성이 제기되었다.

호소의 퇴적물의 경우, 유기물 분해가 지연되어 장기간 저장되는 탄소 흡수원 역할을 수행할 수도 있지만, 산소가 결핍된 혐기성 분해 과정에서 다량의 CH_4 가 생성될 수 있다(Bastviken et al., 2011). 소양호와 같은 깊은 저수지에서는 바닥 퇴적물에서 생성된 CH_4 가 용존산소 농도가 높은 수체에서 산화되어 표층의 CH_4 농도가 상류나 하류의 하천보다 많이 높지는 않다(Jin et al., 2018). 그러나 김기용 등(2018)이 소양호의 5개 지점에서 저수지 깊이 별로 기체포집기를 이용하여 CH_4 의 기포 형태의 배출(ebullition)을 측정한 결과, 소양강 유입부 근처의 비교적 얇은 연안부에서 낙엽이 많이 퇴적된 지점을 중심으로 다량의 CH_4 배출이 확인되었다. 2015년 여름의 긴 가뭄으로 넓은 지역에 걸쳐 소양호의 바닥 퇴적물이 노출되었을 때 Jin et al. (2016)은 수십 년 동안 바닥 퇴적층에 축적된 유기물이 가뭄 기간 동안에 분해가 촉진되어 일반적인 호소 환경에서 관찰되지 않을 정도로 많은 양의 CO_2 , CH_4 및 N_2O 가 배출됨을 확인하였다.

이상의 결과를 요약하면, 국내의 수많은 댐과 소규모 농업 저수지에 퇴적된 유기물은 탄소 저장과 온실가스 배출원이라는 양면적 기능을 가지고 있으나, 현재까지 연구된 결과만으로는 국내 호소환경의 탄소수지를 예측하는 것은 불가능하다. 향후 정확한 탄소수지 예측을 위한 기초조사와 더불어, 저수지 수명이나 가뭄과 홍수 같은 계절적 환경 변화로 인한 온실가스 배출량의 변화를 제대로 파악하기 위한 본격적인 현장조사가 필요하다.

5.2.1.4. 북극 툰드라생태계 탄소순환

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에는 포함되지 않았던 극지생태계의 탄소순환을 추가하여 국내 연구자들에 의해 수행된 연구결과를 중심으로 요약하였다.

북극 온난화에 따른 영구동토(permafrost, 2년 이상 연속적으로 얼어있는 땅)를 포함한 툰드라생태계의 온실가스 피드백은 기후변화 예측에 매우 중요하다. 이 보고서에는 지난 십년간 국내 연구자들이 북극 툰드라생태계에서 수행한 연구 결과를 새로이 추가하였다. 극지연구소는 북극 툰드라 생태계를 대상으로 CAPEC(Circum Arctic Permafrost Environment Change Monitoring, Future Prediction and development Techniques of Useful biomaterials) 프로그램 수행하기 위해, 2011년부터 환북극 국가 내에 6곳의 관측 거점(미국 알래스카 카운실, 캐나다 캄브리지 베이, 노르웨이 스발바르, 그린란드 노르드, 아이슬란드 스토르호피, 그리고 러시아 바라노바)를 구축하고 대기-동토-생태 분야 등의 환경변화를 감시해 오고 있다. 특별히 알래스카 카운실, 캐나다 캄브리지 베이 그리고 스발바르 지역에서 탄소 역학 및 관련 연구가 상대적으로 활발하게 진행되고 있다.

“나무가 없는 넓은 벌판”이라는 뜻의 툰드라는 북극, 고산, 남극 툰드라로 구분되며, 낮은 여름 기온과 긴 겨울이 특징이다(Billings and Mooney, 1968). 식생은 키 작은 관목, 사초과 및 버과 식물, 선대류(이끼 등)와 지의류 등으로 이루어져 있다. 북극 툰드라는 위치에 따라 7월 평균 기온이 약 10℃ 차이를 보이며 식생분포의 변이가 매우 크다. 툰드라의 식생 분포를 보여주는 환북극 식생 지도(CAVM)는 여름철 기온, 식생, 지형 등을 고려하여 툰드라생태계를 다섯 구역 즉, 나지, 버과 식물 툰드라, 기는 형태 관목 툰드라, 직립 관목 툰드라 그리고 습지로 구분한다(Walker et al., 2015). CAVM 이전에는 여름 온도와 식생을 기준으로 북극을 5개(A-E)의 생물기후구역으로 구분하는 방법을 사용하였다(Elvebakk et al., 1999). 북극은 고위도 북극과 저위도 북극으로도 구분하며(Bliss 1997), 대체로 A, B, C 구역은 고위도 북극, 그리고 D와 E 구역은 저위도 북극과 겹친다.

북극해 연안에서부터 남쪽 수목한계선까지 분포하는 북극 툰드라는 지구 육상 면적의 약 8%를 차지하며(McGuire et al., 1997), 대체로 영구동토 분포와 일치한다. 지난 수십 년

동안 북극의 기온은 전지구 평균기온보다 2~3배 빠르게 증가하고 있다(IPCC, 2013). 이런 빠른 기온의 증가는 다양한 환경 변화를 초래하고 있으며, 특히 영구동토의 붕괴에 따른 환경변화는 동토 기반 시설, 생태계 서비스 및 기후변화에 대한 피드백과 관련하여 많은 주목을 받고 있다(AMAP, 2017). 토양층의 녹는 깊이가 증가함에 따라 영하의 상태에서 보존되었던 많은 양의 토양 유기 탄소가 분해 과정을 통해 대기 중으로 방출되어 대기 중 온실 가스 농도가 증가할 수 있다(Schuur et al., 2008). 환북극 동토 지역에 저장된 총 유기 토양 탄소는 1,460~1,600 Pg C로 추정되며, 그 중 약 1/3이 0~3m 깊이에 저장된 양으로, 전지구 토양 유기 탄소의 30%에 해당된다(Hugelius et al., 2014; Schuur et al., 2018). 온난화 시나리오 RCP 8.5 하에서 2100년까지 현재 영구 동토에 저장되어 있는 탄소의 5~15%가 대기로 방출될 것으로 예측된다(Schurr et al., 2015). 따라서, 광대한 북극의 탄소 순환과 미래 예측을 위해서는 다양한 툰드라식생지에서 탄소 역학 변화의 감시와 관련 과정에 대한 많은 연구가 요구된다.

알래스카에서는 CAPEC 프로그램의 관측 거점인 수어드 반도의 카운실을 포함한 여러 지역에서 다양한 식생의 생태계 호흡에 관한 연구가 진행되었다. Kim et al. (2014)은 2011년과 2012년 식생 성장기 동안 카운실 관측지에서 수동 챔버 관측과 모델링을 통해, 토양 호흡의 계절 변동은 토양 온도, 경년 변동은 토양 수분에 의해 좌우됨을 보였다. Kim et al. (2016a)은 수동 챔버를 이용하여 다양한 툰드라의 토양 호흡의 공간 변동을 평가하였다. 사초과 식물의 토양 호흡에 따른 탄소 방출은 지의류와 이끼에 비해 1.5배 컸으며, 면적 대비 중요한 탄소 배출원으로서 자동 챔버를 이용한 연속 관측의 중요성을 강조하였다. Kim et al. (2016b)은 2015년 카운실에서 챔버 관측 및 모델링을 통해 물이끼, 지의류, 사초과의 성장기 동안 적산된 토양탄소의 방출량이 각각 62.0, 126.3, 그리고 133.5 gC m⁻²로서, 연적산 방출량의 84, 64, 그리고 80%를 차지함을 보였다. 또한 눈이 덮인 기간의 평균 방출량은 연적산 방출량의 24%를 차지하였다. 한편, 자동 챔버 사용 이전의 수동 챔버로 관측된 방출량과 큰 차이를 보여, 측정 방법과 빈도가 토양 탄소 수지 산정에 영향을 미칠 수 있음을 지적하였다.

향후 영구동토의 해동에 따른 지형 및 강수 패턴의 변화는 토양수분 분포의 변화를 가져와 탄소 교환에 상당한 영향을

미칠 것으로 예상된다. 알래스카와 러시아 툰드라에서 중장기간의 토양 건조화 실험을 통한 미생물, 토양 열 분포, 식물 군집, CO₂ 및 CH₄ 플럭스 변화에 관한 연구 결과에 따르면, (1) 10년 동안 북극 범람원의 건조는 우선 유기 토양의 열용량과 열전도도를 낮추어 깊이에 따라 온도를 변화시켰고, (2) 산소가 풍부한 상부 토양은 온도가 증가한 반면, 혐기조건의 하부 토양은 온도가 감소하여 여름철동안 녹는 활동층의 깊이가 감소하였으며, (3) 10년의 배수는 관목의 우점도를 크게 증가시킨 반면에 갈래향새풀의 우점도를 감소시켰고, (4) 이러한 식물 군집의 변화가 총일차생산량을 감소시켰고, 상부 토양 온도의 증가와 더불어 생태계 호흡량을 증가시킨 반면, 0.15 m 이하의 깊은 토양에서는 호흡량이 감소하였다(Kwon et al., 2016, 2017, 2019a). 앞에서 언급된 바와 같이 토양 수분의 변화는 깊이에 따라 다른 온도 변화를 초래하여 유기 탄소 분해 속도에 다르게 영향을 미쳤으며, 토양이 건조해짐에 따라 통기조직을 갖는 식물의 우점도가 감소하면서 토양 내의 오래된 탄소 방출을 감소시키는데 기여하였다. 알래스카의 습윤 툰드라에서도 비슷한 현상이 관찰되었는데, 이것은 선행연구들이 영구동토층이 녹을 경우 토양이 더 습해져서 오래된 탄소의 분해속도가 증가할 것으로 경고했으나, 영구동토층이 녹으면서 건조한 지역이 생길 경우 이를 상쇄할 수도 있음을 시사한다.

한편, 범람원의 배수는 CH₄ 방출에 영향을 미친다. Kwon et al. (2017)은 토양의 건조가 1) 메탄산화균과 메탄생성균의 우점도를 동시에 낮추고, 2) 산소가 풍부한 상부 토양의 온도는 증가시킨 반면, 혐기 조건의 깊은 토양의 온도를 감소시켰으며, 3) 통기조직을 가진 갈래향새풀의 우점도를 상당히 감소시키면서, 대조구 관측지에 비해 메탄 방출이 현저하게 감소하였음을 보였다.

툰드라생태계의 다양한 토양 미생물은 토양 유기 탄소를 분해하고 대기 중으로 온실가스를 방출하는데 중요한 역할을 담당한다. Kim et al. (2014)은 알래스카 카운실의 습윤하고 산성인 툰드라 지역에서 박테리아 군집 구조와 토양 특성을 조사하여, 토양의 깊이와 pH가 군집 구조를 결정하는 가장 중요한 인자임을 밝혔다. Ro et al. (2018)은 카운실 툰드라의 토양 시료를 이용한 실내 배양 연구에서, 세 가지 온도 조건(동결 유지, 해동 유지, 동결-해동 반복)과 두 가지 수분 조건(포화와 불포화)에 대한 배양 실험을 수행하여, 계절 동토와

영구동토에서 온도 및 수분 증가에 의해 쉽게 분해되는 유기물이 기후변화에 양의 피드백을 주는 물질로 활용될 수 있음을 보였다. Trpathi et al. (2019)은 이 지역의 1.5 m 깊이의 토양 코어를 대상으로 탄소 순환에 관여하는 미생물과 기능성 유전자들에 대한 연구를 수행하여, 토양 상층부에서 다양한 유기물 분해 유전자들을 확인하였고, 하층부로 갈수록 메탄 생성과 산화에 연관된 유전자들을 검출하였다.

환경변화에 따른 미생물 군집과 CO₂ 및 CH₄ 플럭스 역학에 관한 Kwon et al. (2019b)의 문헌조사에 따르면, 보다 습해진 조건에서는 혐기성 세균이 많은 Bacteroidetes, Chloroflexi, Firmicutes가 증가하고, 메탄생성 및 산화균의 풍성도가 증가하여, 혐기성 토양 유기 탄소 분해 및 메탄 방출이 강화되었다. 보다 건조한 조건에서는 호기성 세균이 많은 Acidobacteria와 Alphaproteobacteria의 우점도가 증가하고 메탄 생성 및 산화균은 감소하여 호기성 토양 유기 탄소 분해와 탄소 방출을 가속화시켰다.

토양유기탄소는 기후변화에 취약하지만 고위도 북극에서의 연구는 매우 부족하다. 고위도 북극인 스발바르 군도는 CAVM 기후-식생 분포에서 나지(지의류 및 이끼류 간헐적 분포)가 대부분이며, 일부 지역이 기는 형태 관목 툰드라 구역에 속한다. 이 지역은 기후변화로 인해 빙하가 빠르게 후퇴하고 있고, 빙하 후퇴지역에서 식생 및 미생물 천이가 진행되고 있다. Jung et al. (2014)의 스발바르 Vestre Lovénbreen 빙하 후퇴 지역의 식생과 토양 탄소 측정 결과, 토양 유기 탄소는 식생이 많고 빙하 후퇴가 오래 전에 진행된 지역에서 높았고, 과거 토양 교란이 식생 발달과 토양 유기 탄소 분포에 영향을 줄 수 있음을 보였다.

Chae et al. (2016a)은 빙하에서 상대적으로 멀리 떨어져 식생이 발달한 스발바르의 연구 지역에서 CO₂ 방출과 관련하여 생물학적 토양 표층의 역할에 주목하였다. 생물학적 토양 피각(시아노박테리아, 조류, 지의류, 선태류로 구성)은 빙하 가장자리에 광범위하게 분포하며, 1차 천이의 후기에 더욱 발달한다. 수동 챔버를 이용하여 2007년부터 2009년까지 생물학적 토양 피각을 포함한 나지, 이끼 등에서 CO₂ 방출량과 주변 토양 온도 및 수분을 측정한 결과, 생물학적 토양 피각의 면적, 작은 자갈의 양 및 주변의 식생 분포가 토양의 탄소 방출에 중요한 역할을 하였다. 모든 효소 활동이 미네랄 토양보다 생물학적 토양 피각에서 높았고 효소의

활성도는 토양 탄소 방출과 양의 상관을 보였으며 생물학적 토양 피각으로부터 방출되는 탄소량은 그 분포 면적을 고려할 때 이끼와 관목 식물의 방출량에 견줄만한 양이었다.

끝으로, 지면 근처 기온, 상대습도, 토양 온도 및 수분 등의 환경인자의 공간 변동 관측을 위해 유비쿼터스 센서 기반의 원격 모니터링 기술이 알래스카 카운실 관측 거점에서 적용되었다(극지연구소, 2018). Chae et al. (2016b)은 지표면 주변의 환경인자들의 변화가 논, 해방과 동결에 영향을 받으며, 토양 온도의 변화는 논 덮임의 분포와 겨울철 적설의 공간적인 차이에 따라 달라짐을 고려하여 환경인자들을 관측지의 생태계 호흡량 분석과 추정에 사용하였다.

5.2.2. 탄소순환 모델링 및 관측 융합

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 식생-기후 모델링에 의한 되먹임 과정 연구, 탄소순환 모델링 개선과 관측 결과와의 비교를 통한 성능평가 민감도 분석 및 모델링 기반의 탄소 수지 산정에 대해 요약하였다. 특히 여름 장마로 인한 탄소수지의 변화로 탄소 흡원 강도가 약화될 수 있음을 보고하였고, 몬순에 의한 이러한 생태계 교란이 모델링에 제대로 반영되어 있지 않음을 지적하였다.

5.2.2.1. 관측자료 기반의 모델링

국내에서 10년 이상 지속적으로 관측된 장기 탄소 플럭스 자료는 드물다. 현재 국가농림기상센터에서 관리하고 있는 국내 플럭스 관측망인 KoFlux (Korea Flux Monitoring Network)가 2002년 출범했을 당시부터 현재까지 관측이 지속되고 있는 해남 농경지(HFK)와 국립산림과학원의 장기 생태연구가 20년 넘게 진행되고 있는 광릉수목원의 활엽 수림(GDK)과 침엽수림(GCK)이 대표적인 장기 탄소 플럭스 관측지점이다. 이러한 장기 탄소 플럭스 자료는 기작기반 모형의 모수화나 개선에 사용되며, 위성자료와 연계하여 다양한 규모의 육상생태계 탄소 플럭스 산정과 지도제작 등에 활용되고 있다. 이러한 활용의 선결조건은 관측기간 동안 자료의 품질이 일관되게 유지되어야 한다는 점이다.

이를 위해 플럭스 관측망 내 플럭스 관측 장비 간의 호환성 담보를 위한 야외 상호 비교 실험(강민석 등, 2019), 표준화된 플럭스 자료처리 방법의 개선(강민석 등, 2018; Kang et al., 2019)과 광릉의 두 산림 관측지에서 야간에 이류의 영향을 강하게 받은 CO₂ 플럭스 제거를 위한 품질관리 필터(Kang et al., 2017)를 비롯한 관측지 별로 특화된 품질관리 방법의 개선이 지속적으로 이뤄지고 있다.

Ryu et al. (2019)의 전지구 육상 광합성에 대한 재고에 따르면, 육상광합성 모니터링에서 입력자료(복사, 군락의 구조(엽면적지수, 군락에 의해 흡수되는 빛의 비율), 모형의 구조(질소, 온도, 토양수분 등)의 높은 불확도가 개선되어야 할 부분으로 진단되었다. 전지구 광합성은 모형에 따라 약 100~145 Pg C yr⁻¹에 이르는 넓은 범위의 값들이 제시되었고(그림 5.2), 이렇게 큰 불확도를 줄이는 것이 탄소순환 모델링의 가장 중요한 첫 단계로 지적되었다.

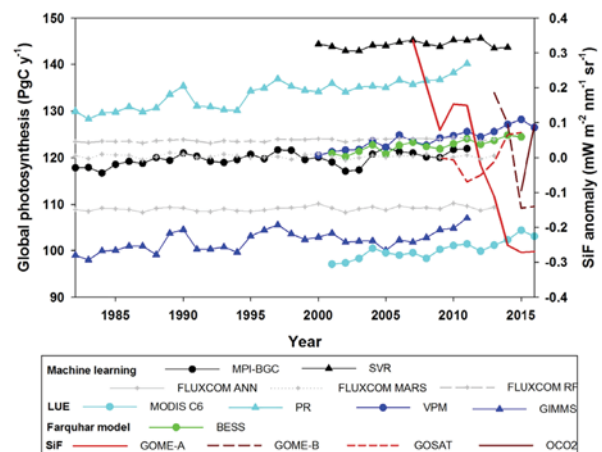


그림 5.2. 원격탐사기반 산출물 간의 전지구 연간 광합성 및 SiF의 시계열 (Ryu et al., 2019).

Jiang and Ryu (2016)은 원격탐사 기반의 광합성/증발산 모형 BESS(Breathing Earth System Simulator: Ryu et al., 2011) 버전 1을 개발하고, 글로벌 네트워크인 FLUXNET의 113개 플럭스 관측지의 총 742년 관측 자료를 이용하여 모형의 계절변동, 연간변동, 경향, 공간 변이를 평가하였다. 그 결과, 전지구 육상 광합성 연평균 값은 122 Pg C yr⁻¹로 추정하였고, 2001~2016년 기간 동안 전지구 광합성이 증가하는 경향을 보여주었다(그림 5.3). Huang et al. (2018)은 벼를 대상으로 한 BESS-Rice를 개발하여 철원,

김제 및 해남의 논에서 관측된 플렉스 자료를 이용하여 평가했다. 광합성을 통해 고정된 탄소가 잎, 줄기, 뿌리, 낱알로 재분배되는 알고리즘을 현장 관측자료를 이용하여 검증한 BESS-Rice모형은 현장에서 관측된 수확량의 시공간 변동의 82%를 설명하였으며 bias는 3.5%였다.

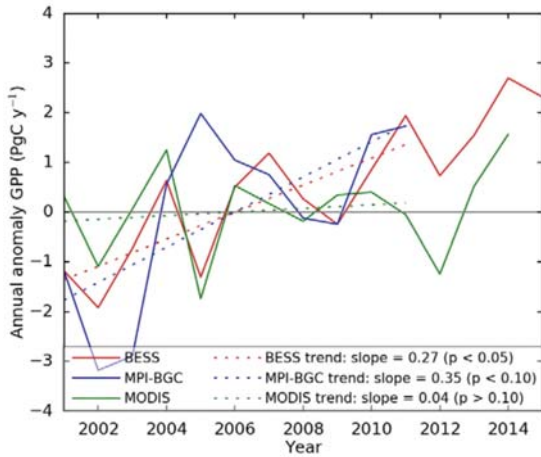


그림 5.3. 원격탐사기반 산출물 간의 전지구 연간 GPP 아노말리 (Jaing and Ryu, 2016).

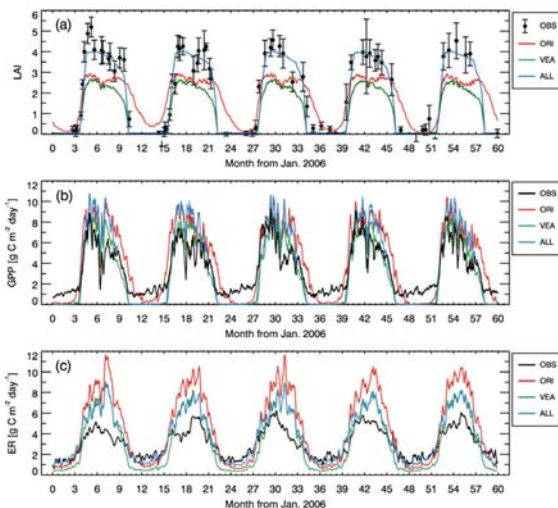


그림 5.4. 광릉 활엽수림을 모사한 모형(모수화 개선 전후)-관측 간 (a) 엽면적지수, (b) 총일차생산량, (c) 생태계 호흡량의 비교 (Gim et al., 2017).

Gim et al. (2017)은 장기 탄소 플렉스 관측자료를 사용하여 식물의 잎과 세균을 포함한 동화된 탄소 할당 모수화 체계를 개발하였다. 이 모수화 과정은 기후학적인 식물의

순일차생산량을 따라 결정되는데, 광릉 활엽 및 침엽수림의 플렉스 타워 관측자료를 기반으로 개발 및 평가되었다(그림 5.4). 개선된 모형의 결과는 관측값과 잘 일치하였으며, 엽면적지수, 총일차생산량, 생태계호흡 및 잠열플렉스의 계절변화를 잘 모의했고 개선 전보다 향상된 결과를 보였다.

기계학습법에 의한 장기 관측자료와 원격탐사의 접목은 농림생태계 탄소순환을 이해하는데 새로운 기회를 제공한다. 이보라 등(2019)은 광릉 활엽수림 및 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 인공위성영상 자료를 사용하여 기계학습 알고리즘에 기반을 둔 산림 생산성 추정모형들을 구축하고 활용 가능성을 확인하였다.

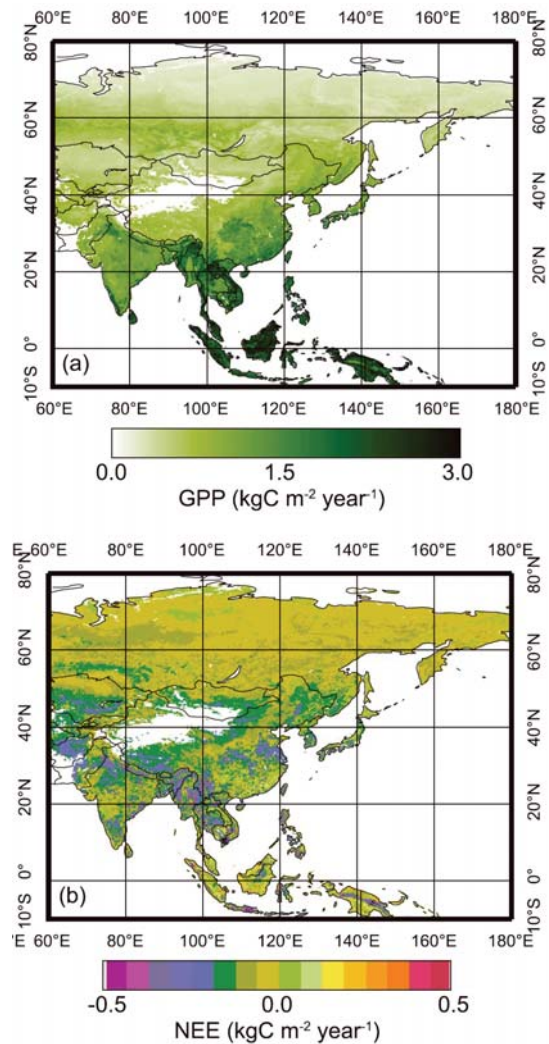


그림 5.5. 데이터 주도적 접근법으로 얻어진 아시아 지역의 2000-2015년 평균 연적산 총일차생산량(a)과 순생태계교환량(b) (Ichii et al., 2017).

Ichii et al. (2017)은 광릉 활엽수림과 침엽수림, 해남 농경지가 포함된 AsiaFlux(아시아 플럭스 관측망) 데이터 베이스의 총일차생산량과 순생태계교환량을, MODIS로부터 원격탐사를 통해 얻어진 지면온도, 엽면적지수, 식생 및 수분지수 자료 등을 사용하여 가용한 위성자료의 시공간 범위만큼 기계학습법(서포트 벡터 회귀, SVR) 기반의 데이터 주도적 접근법을 이용해 아시아 전 지역으로 확장하였다(그림 5.5). 2000년부터 2015년까지 연구지역의 평균 연간 총일차생산량은 각각 $34.3 \text{ Pg C yr}^{-1}$, $-3.03 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 였고, 지역별로 보면 GPP는 시베리아가 $6.91 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 동아시아가 $6.08 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 남아시아가 $4.12 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 동남아시아가 $15.56 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 였다. 순생태계교환량은 시베리아가 $-0.49 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 동아시아가 $-0.90 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 남아시아가 $-0.44 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 동남아시아가 $-0.94 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 였다. 이러한 결과는 아시아를 대상으로 CO_2 플럭스 평가와 생태계 모형 검증을 위한 새로운 기회를 제공한다.

다만 이러한 기계학습법을 기반으로 모형을 구축할 때, 생태계 상태 변화가 추정기간 중에 존재하는지 여부를 확인하여야 한다. Kang et al. (2019)은 해남 농경지에서 10년 이상 장기간 관측된 자료를 사용해 SVR 기반 플럭스 추정 모델을 구축 및 평가하여, 모형 훈련에 사용된 관측 자료의 기간이 늘어날수록 모형의 플럭스 계절변동 예측성은 좋아 지나 모형 훈련에 사용된 자료의 관측 기간 내에 작물의 품종 변화와 같은 생태계 상태 변화가 존재하면 모형의 플럭스 경년변동 예측성은 반대로 떨어질 수 있음을 보였다. Yang et al. (2019)은 광릉 활엽수림의 탄소 플럭스 관측 자료를 열역학적으로 분석하여, 생태계의 성장과 교란에 따른 상태 변화를 엔트로피의 변화로 설명하였다.

원격탐사 기반의 엽면적 지수는 불확실성이 큰 반면에 기계학습 기반의 탄소순환 모형의 핵심 입력자료 중 하나이기 때문에 불확실성을 최소화해야 한다. Jiang et al. (2017)의 연구에 따르면, 5개의 위성기반 장기간 엽면적지수 생산 결과물을 비교한 결과, 절댓값, 연간 변동, 경향 간의 차이가 매우 컸다. 따라서, 이러한 불확실성을 염두에 두고 기계학습의 입력자료로 활용해야 하며, 입력자료의 불확실성에 따른 탄소순환 모형 산출물의 불확도를 정량화하는 과정이 필수적이다.

메탄 플럭스의 경우 CO_2 플럭스보다 관측기간이 상대적

으로 짧으나, 가용한 자료를 활용하여 지역 및 전국단위 메탄 방출량 추정과 검증이 이뤄지고 있다. 최성원 등(2016, 2018)은 Kim et al. (2016)에서 제안한 수정된 물관리 보정인자와 2010년 농림어업총조사의 전수자료, 그리고 2006 IPCC 지침의 메탄 배출량 산정법 및 계산 프로그램을 이용하여, 전국 시군별 벼 재배 논에서 발생하는 메탄 배출량을 산정하였다. 산출된 단위 면적 당 메탄 배출량의 전국 평균은 $380 \pm 74 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 였으며, 수정된 물관리보정이 되지 않은 국가배출계수를 사용하여 보고된 메탄 배출량보다 많을 뿐 아니라 큰 차이를 보였다. 전반적으로 서부 지역이 동부 지역보다 더 높은 추세를 보였고(그림 5.6), 이러한 지역차를 발생시키는 주요인으로 유기물시용여부와 경작 일수가 그 차이를 상쇄 또는 심화시키는 역할을 하는 것으로 나타났다. 산정된 값은 김제, 철원, 해남 논에서 관측된 다년간의 자료로 검증하여 추정의 불확실성을 평가하였다.

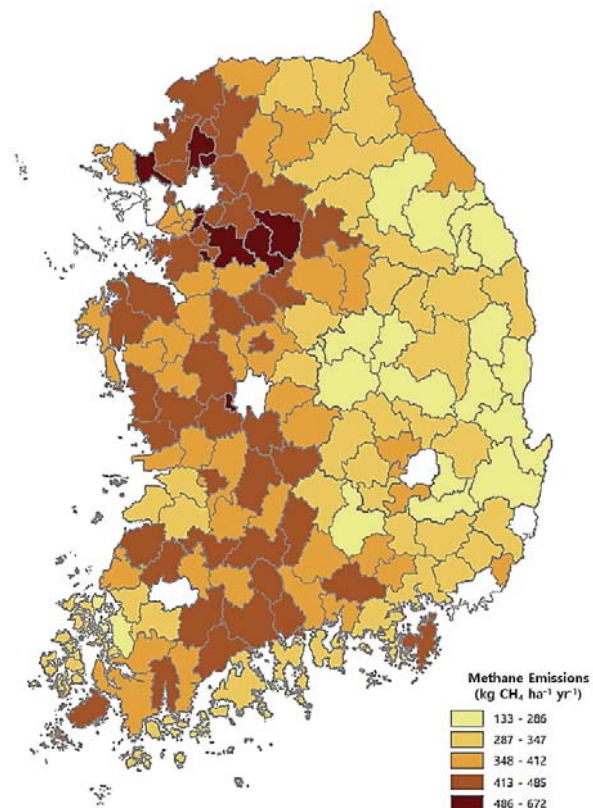


그림 5.6. 2010년 농림어업총조사의 전수자료에 기반한 전국 시군 논 단위면적 당 메탄 방출량 (최성원 등, 2018)

5.2.2.2. 아시아 탄소추적시스템

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 한반도를 포함한 아시아 지역의 이산화탄소 배출량을 연구할 수 있는 농도 관측 기반의 아시아 탄소추적시스템의 구축을 소개하였다. 또한 예비 성능 평가를 통해 운영 기반이 마련되었으나, 관측 지점 간 간격이 넓고 불규칙하여 검증된 위성 관측의 활용이 필요함을 지적하였다. 본 평가보고서에서는 이러한 항공 및 위성 관측 자료를 탄소추적시스템에 동화하기 위한 전처리 체계, 관측연산자 및 자료동화체계 개발과 탄소추적시스템의 향상 결과를 요약하였다.

지표 탄소 플럭스를 파악하기 위한 플라스크, 위성 관측, 에디공분산법 등 관측에 기반을 둔 방법들은 오차가 상대적으로 작은 반면 관측의 시공간 범위의 제약으로 인해 제한적인 탄소 플럭스 정보를 제공한다. 시공간적으로 더 균질한 지표 탄소 플럭스를 파악하는 방법으로는 모형의 열개 내에 관측자료를 융합하여 추정하는 인버스(또는 역) 모델링 방법이 있다. 인버스 모델링은 대기 수송 모형과 자료동화 방법을 이용하여 대기 중 CO_2 의 몰농도 관측자료로부터 지표 탄소 플럭스를 추정한다. 인버스 모델링의 하나인 탄소추적시스템(CarbonTracker)은 미국 해양대기청(NOAA)에서 전지구 영역에 대해 개발하였다(Peters et al., 2007, 2010). 이를 우리나라 국립기상연구소에서 도입하여 아시아 지역의 지표 탄소플럭스를 추정하는 아시아 탄소추적시스템으로 개발하였고(Cho, 2013), 아시아 지역에 대해 최적화되어 좀 더 정확한 지표 탄소 플럭스를 산출함을 보였다(김진웅 등, 2012; Kim et al., 2014a).

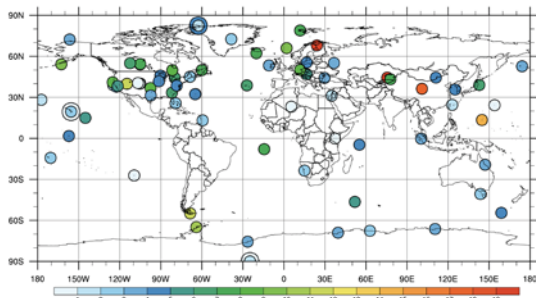


그림 5.7. 2001년부터 2009년까지 각 이산화탄소 몰농도 관측지의 평균 분석민감도 분포 관측 위치가 같거나 가까워서 겹치는 관측지는 원의 크기를 다르게 해서 표현함(Kim et al., 2014b)

아시아 탄소추적시스템에서 쓰이는 자료동화방법은 앙상블 칼만필터이다. 추정된 지표 탄소 플럭스의 정확도는 자료 동화에 이용되는 관측자료의 질과 양에 상당 부분 의존한다. Kim et al. (2014b)은 각각의 관측 자료가 지표 탄소 플럭스 추정에 미치는 영향을 정량화하여 관측 자료의 상대적인 중요도를 진단하였다. 그림 5.7은 지표 탄소 플럭스 추정에 대해 각 관측지의 관측 자료가 미치는 상대적인 영향을 나타낸다. 전구에 대해 평균된 누적 분석민감도는 19%로서, 인버스 모델링에서 관측 자료가 자료동화되어 모형에서 생성되는 배경장을 19% 수정하여 더 정확한 지표 탄소 플럭스를 추정함을 의미한다. 분석민감도를 분석한 결과, 북미 지역과 기타 지역 간에 관측 정보의 불균형이 존재하며, 아시아 지역에서 북미 지역과 같은 정확도로 지표 탄소 플럭스를 추정하려면 관측지가 더 많이 필요함을 확인하였다.

아시아 지역은 CO_2 관측지가 부족하기 때문에 지표 탄소 플럭스 추정값이 북미나 유럽에 비해 불확도가 크다. 이를 보완하기 위해 Kim et al. (2017)은 시베리아 지역의 대기 중 CO_2 몰농도 관측자료(Japan Russia Siberian Tall Tower Inland Observation Network: JR-STATION자료)를 아시아

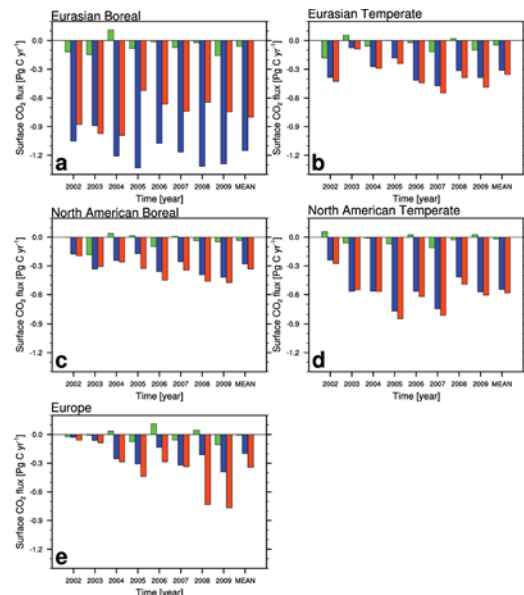


그림 5.8. 연평균 생권 플럭스(Pg C yr^{-1}). Prior 플럭스(녹색), JR 자료를 동화하지 않은 실험의 플럭스(파란색), JR 자료를 동화한 실험의 플럭스(붉은색): (a) 유라시아 북부한대, (b) 유라시아 온대, (c) 북미 북부한대 (d) 북미 온대, (e) 유럽 (Kim et al., 2017)

탄소추적시스템에 추가적으로 자료동화하였다. 그 실험 결과를 JR-STATION 자료를 사용하지 않은 결과와 비교했을 때, 전구적으로는 지표 탄소 플럭스 간 차이가 거의 없었으나, 지역적으로는 차이를 보였다. 시베리아 지역은 지표 탄소 플럭스의 흡수가 줄어든 반면, 유럽 지역은 지표 탄소 플럭스의 흡수가 증가하였다(그림 5.8). 유라시아 북부한대(Boreal) 지역의 지표 탄소 플럭스의 불확도는 29% 감소하고, 분석 민감도는 북미의 타워 관측지보다 60% 커서 시베리아 지역의 관측 자료가 매우 중요한 역할을 함을 확인되었다.

Kim et al. (2018a)은 아시아 지역의 지표 탄소 플럭스 추정을 최적화하기에 적합한 주요 자료동화 모수(자료동화 창의 길이와 앙상블의 크기)를 평가하였다. 전반적으로는 앙상블 크기의 영향이 자료동화 창의 길이보다 컸으나, 지역에 따라 두 모수의 영향의 크기가 달랐다. 앙상블 크기가 클수록 자료동화 창의 길이가 작을수록 최적화된 지표 탄소 플럭스의

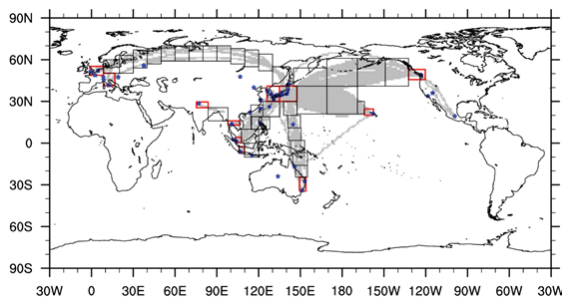


그림 5.9. CONTRAIL 항공 관측 자료의 분포(회색), 공항 위치(파란색), 자료동화를 하기 위해 관측 자료를 평균하는 격자는 네모로 표기(검은색은 비행모드, 붉은색은 이착륙 모드)(김현정 등, 2018)

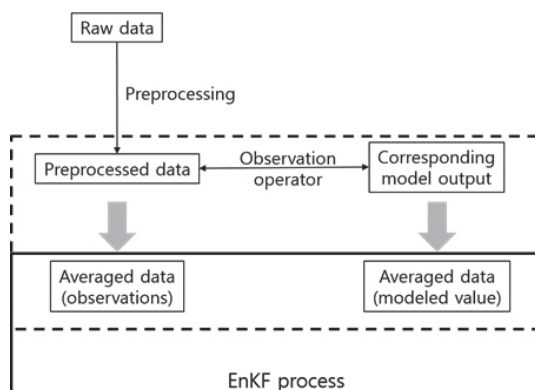


그림 5.10. CONTRAIL 항공 관측자료를 자료동화하는 시스템 모식도(김현정 등, 2018)

불확도가 컸다. 다양한 검증 결과, 아시아 지역은 200개의 앙상블 크기와 10주간의 자료동화 창을 사용할 때 플럭스 추정의 오차가 가장 작았다.

아시아의 지표 탄소 플럭스의 불확도를 줄이려면 북미나 유럽처럼 공간적으로 비교적 균질하게 분포되고 시간적으로 연속해서 관측되는 CO₂ 물농도 지상 관측 자료가 필요하다. 시공간적으로 불충분한 아시아 지역의 지상 관측 자료를 보완하기 위해 항공기나 위성에서 관측하는 자료를 아시아 탄소추적시스템에 동화하도록 하는 것이 필요하다.

김현정 등(2016)은 탄소추적시스템을 이용하여 지상 관측 자료만 자료동화하여 추정된 플럭스 자료로부터 모사한 대기 중 CO₂ 농도를 JAL 항공기에서 관측된 자료(Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner, CONTRAIL) (Machida et al., 2008; Matsueda et al., 2008)를 이용하여 비교 검증하였다. 더 나아가 김현정 등 (2018)은 CONTRAIL 자료 자체를 탄소추적시스템에 동화하는 체계를 개발하였고(그림 5.9, 5.10), CONTRAIL 자료의 동화가 지표 탄소 플럭스 추정에 미치는 영향을 살펴본 결과, CONTRAIL 자료를 동화했을 때의 결과가 관측 자료와 훨씬 유사해짐을 보였다.

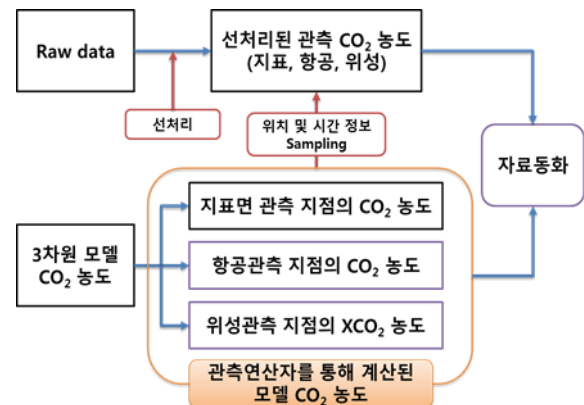


그림 5.11. 지상 관측자료, CONTRAIL 항공 관측자료, GOSAT 위성 관측 자료를 함께 동화하도록 개발된 탄소추적 시스템의 자료동화 모식도(김현미 등, 2018)

위성에서 관측된 대기 중 CO₂ 물농도 자료를 이용하면 시공간 적용 범위가 크기 때문에 보다 균질하고 많은 관측 자료를 이용한 인버스 모델링이 가능하다. 김현미 등(2018)은 온실가스를 관측하는 정지기상위성인 Greenhouse gases

observing satellite (GOSAT)에서 관측된 컬럼 CO_2 물농도 자료인 XCO_2 를 자료동화에 활용하여 지표 CO_2 플럭스를 진단하였다. 항공 관측 자료인 CONTRAIL과 마찬가지로 GOSAT 관측 자료를 탄소추적시스템에 동화하기 위해 전처리 체계와 관측연산자 및 자료동화체계를 개발하였다. 그 결과, 지상 관측자료 외에 CONTRAIL 자료와 GOSAT 자료를 더 동화하는 아시아 탄소추적시스템을 개발하였다(그림 5.11).

그림 5.12는 지상, CONTRAIL, GOSAT 세 종류의 관측 자료를 자료동화하는 탄소추적시스템을 이용하여 산출한, 2010~2011년의 지역별 연 탄소 플럭스를 나타낸다. 지상 관측자료만 동화한 CNTL 실험에서 지표 탄소 흡수가 가장 큰 지역은 시베리아인데 추가적인 관측 자료, 특히 GOSAT 자료를 동화함으로써 이 지역의 지표 탄소 흡수량이 감소하고 유럽 지역의 지표 탄소 흡수량이 증가하는 효과가 있음을 확인할 수 있다. 따라서 추가적인 관측 자료의 동화로 인해 지표 탄소 플럭스의 강도, 흡수 및 배출 분포가 재조정 되는 것을 확인할 수 있다.

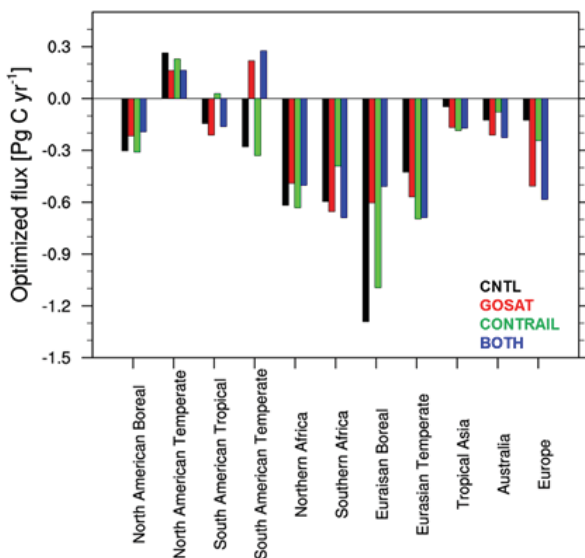


그림 5.12. 2010~2011년의 연간 지표 탄소 플럭스(CNTL: 지상관측자료만 동화한 실험, GOSAT: 지상과 GOSAT 관측자료를 동화한 실험, CONTRAIL: 지상과 항공 관측자료를 동화한 실험, BOTH: 지상, 항공, 위성 관측자료를 모두 동화한 실험(김현미 등, 2018)

인버스 모델링 기반의 지표 탄소 플럭스 추정값과 관측 자료 기반의 지표 탄소 플럭스 추정값 간에는 차이가 존재한다. 그림 5.13은 탄소추적시스템에서 도출된 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자 단위별 순 생물군계 생산량(net biome productivity, NBP)의 평균 연간 총량과 Ichii et al. (2017)의 타워기반의 지표 플럭스 실측과 위성자료를 사용하여 서포트 벡터 회귀(SVR) 기계 학습 방법으로 도출된 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 격자 단위별 순 생태계 교환량(net ecosystem exchange, NEE)의 평균 연간 총량을 비교한 것이다. 탄소추적시스템에서 산출된 NBP는 인위적 활동에 의한 토지사용/피복의 변화나 산림벌채 등에 의한 탄소의 방출/흡입을 포함하기 때문에 이러한 자료를 조사하여 고려해 주지 않는 한, 온전한 비교가 될 수 없다. 그러나 인위적인 활동이 많지 않은 지역의 경우에는 이러한 추가적인 탄소의 교환량이 상대적으로 작기 때문에 의미 있는 정성적 비교가 가능하다. 전반적으로 두 결과가 큰 차이를 보인다. 인버스 모델링인 탄소추적시스템의 NBP는 강한 탄소의 흡원으로 나타나는 유라시아 지역을 제외하면, 아시아 전역에 걸쳐 탄소 중립에 가까운 분포를 보인다. 반면, SVR의 NEE는 유라시아 지역이 탄소 중립에 가깝고, 아시아 지역 전반이 상대적으로 강한 탄소의 흡원이다. 인버스 모델링의 경우 물농도 관측소가 충분하지 않고, 이에 따른 결과의 민감도의 정량화가 필요하다. SVR의 경우에도 현재 인도 지역의 관측 부재와 적도 및 아열대 지역의 불확실성이 개선되어야 한다. 또한 NBP와 NEE의 본질적인 차이를 야기하는 인위적인 탄소 방출/흡입에 대한 추가적인 연구 조사가 필요하다.

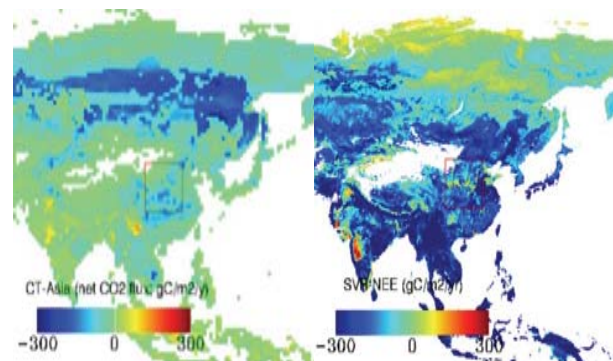


그림 5.13. (좌)탄소추적시스템의 $1^\circ \times 1^\circ$ 순 생물군계 생산량(net biome productivity, NBP)과 (우)SVR 기반의 기계 학습 방법으로 도출된 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 순 생태계 교환량 NEE(김현미 등, 2018)

아시아 지역의 지표 탄소 플럭스를 인버스 모델링을 이용하여 좀 더 정확히 파악하기 위해서는, (1) 탄소추적시스템과 같은 인버스 모델링 시스템의 지속적인 개발(고해상도 인버스 모델링 시스템 개발, 자료동화 방법 최적화, 대기수송모형의 개선), (2) 더 많은 양질의 관측자료의 확보(전략적인 관측망 디자인을 통한 지상 관측지 추가와 최적화, 항공기와 위성 등 3차원 관측자료의 자료동화), (3) 하향식 인버스 모델링 결과와 상향식 관측자료 기반 결과의 지속적인 비교 분석을 통한 CO₂ 수지 분석 및 불확도의 정량화 과정이 필요하다.

5.3. 기타 생지화학순환

5.3.1. 질소순환

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 질소순환에 관한 일반적인 소개와 주로 챔버를 사용한 국내 관측 결과를 요약하였다. 질소는 생물성장의 필수원소로서 미생물에 의해 생물이 사용가능한 형태의 질소화합물로 토양 내에서 전환(질소고정)되고, 다시 대기로 배출되는 순환과정을 거친다. 화석 연료 및 질소 비료의 사용과 폐수로의 질소 방출 등에 따른 과다한 질소의 배출이 부영양화를 초래하여 담수생태계를 위협한다. 대기로 방출되는 아산화질소는 지구온난화를 가속화시킨다. 다른 질소산화물과 암모니아는 대기질을 악화시키며, 토양의 산성화를 초래하여 생태 환경에 심각한 영향을 미친다.

5.3.1.1. 국내 생태계의 지표 질소 배출

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에 보고된 질소 순환에 관련된 국내 연구의 경우, 대부분 농경지로부터의 아산화 질소 배출량 산출과 IPCC 지침에 따른 국가고유배출계수 개발을 위한 연구가 대부분이었다. 이후의 국내 연구 사례가 많지 않아, 담수생태계에 관련된 최근 결과만 추가하였다.

질소 생지화학순환의 경우, 인류가 넘어서는 안되는 생태학적 한계를 이미 오래전에 넘어서었다(Rockstrom et al., 2009). 온실가스인 아산화질소의 농도는 산업화 이전보다 약 20% 높아졌고 주로 화학비료와 축분 사용에 따른 인위적

활동이 주요 원인이다. 최근의 한 총설에 따르면 농업 부문이 인간 활동에 의해 지구환경 전체로부터 배출되는 N₂O 연간 배출량(5.3 Tg N₂O-N yr⁻¹)의 66%를 차지하는 것으로 추정된다(Davidson and Kanter, 2014). 농경지 토양의 N₂O 배출에 비해서는 적은 양이지만, 농경지 유출수나 도시 하수의 영향을 많이 받는 하천과 호소의 N₂O 배출이 최근 들어 크게 증가하고 있다(Beaulieu et al., 2011; Turner et al., 2015). Beaulieu et al. (2011)은 전세계 하천에서 배출되는 N₂O가 전세계에서 인위적으로 배출되는 N₂O의 10%에 육박하는 것으로 추정하였다. 한국의 하천과 호소에서 배출되는 N₂O에 대해서는 한강 유역에서 실시된 소수의 현장조사 결과만 보고되어 있다(Jin et al., 2016, 2018). 이러한 기초 조사에 따르면, 질소 농도가 높은 댐 구간이나 한강 하류에서 N₂O 농도가 비교적 높게 나타났다. 한강 하류의 경우 하수처리장 방류수가 N₂O의 주요 배출원으로 지목되었지만(Jin et al., 2018), 하류의 하천수나 퇴적물에서 어떤 환경 조건에서 N₂O 배출이 결정되는지 파악하기 위한 연구와 지속적인 모니터링이 요구된다. 또한 산림을 통한 유출과 관련하여 탄소와 질소를 동시에 모의하는 모델링과 관측 기반의 추가적인 연구가 필요하다(Kim et al., 2019).

5.3.2. 단수명 기후변화유발물질순환

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서는 주로 단수명 기후변화유발물질인 휘발성유기탄소화합물, 질소산화물 및 황산화물의 산화, 오존 및 에어로졸 형성 등의 변화 양상, 배출과 흡수 기작 및 변동성에 관해 소개하였다. 또한 국내 관측 자료가 부족한 상황에서 AsiaFlux와 iLEAPS (integrated Land Ecosystem Atmosphere Process Study)의 지원과 협력을 통해 iLEAPS Korea가 발족되어 본격적인 연구가 2013년부터 시작되었고 그 연구 결과를 본 평가보고서에 추가하였다.

우리나라는 전체 국토의 약 2/3가 산림이며 도시 숲이 증가하고 있으므로 자연적으로 발생하는 휘발성유기화합물(biogenic volatile organic compounds, BVOCs)에 대한 정확한 진단과 오존 및 에어로졸의 생성에 미치는 영향과 되먹임 작용에 대한 이해가 필요하다.

탄소, 질소 및 황은 지구시스템을 구성하는 주요 원소로서 기체, 액체 및 고체 상태의 지구시스템 구성 성분과 생체에 다양한 화합물의 형태로 존재하고 이들 각 권역 사이를 순환하며 지구환경과 생태에 중요한 영향을 미친다. 반응성이 낮아서 대기 중 체류 기간이 길고 농도가 수백 pptv 정도 이상인 CO_2 와 CH_4 , 그리고 N_2O 는 온실가스로서 지구 기후에 직접적인 영향을 미친다. 상대적으로 농도는 아주 낮지만 반응성이 큰 휘발성유기탄소화합물(VOCs), 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_2) 등은 대기 중에서 산화되며 오존과 에어로졸을 생성한다. 인간 활동의 결과로, 온실가스와 반응성 기체 그리고 이차 생성물인 오존과 에어로졸의 농도가 크게 증가하여 지역 규모에서는 대기질의 저하를 가져오고, 전 지구적으로는 기후변화에 영향을 미친다. 오존과 에어로졸은 일반 온실가스와는 달리 대기 중 수명이 일주일 정도로 짧아서 단수명 기후변화유발물질(short-lived climate pollutants)로 구분된다(IPCC, 2013). 또한 오존은 OH 라디칼을 생성하여 오존과 에어로졸을 생성하는 전구물질의 대기 중 수명을 결정하며, 에어로졸은 구름과 얼음응결핵을 만들어 물 순환에 관여하여 기후변화에 간접적으로 기여한다.

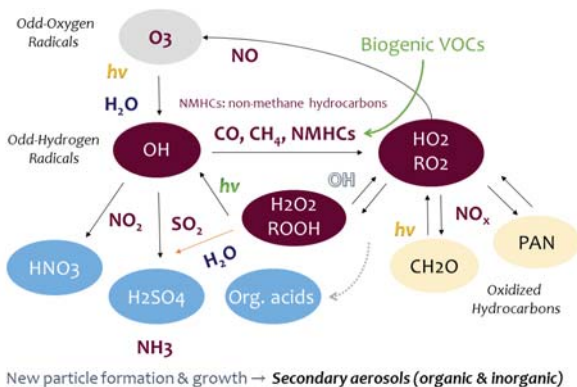


그림 5.14. 대기중 오존과 미세먼지를 생성하는 기본 광화학 반응

따라서 반응성 미량기체의 대기 중 변화 양상과 변동성, 즉 배출과 흡수 기작 그리고 변동성에 미치는 인간의 영향(perturbation)을 정확하게 파악하는 것이 기후변화 예측에 매우 중요하다. 이들 물질은 지구의 생지화학순환 과정을 통해 대기 중으로 유입되어 변화되고 소멸되는데 이 과정이 기후시스템과 연계되어 있다. 인간의 활동에 의한 교란은 생지화학순환을 거치며 되먹임작용을 통해 증폭(positive

feedback)되거나 감쇄(negative feedback)되어 결과적으로 기후변화에 영향을 미치게 된다. 생지화학 물질 순환의 핵심인 이 되먹임작용은 지구의 다양한 시공간 범위에서 복잡한 과정을 통해 진행되는데 특히 생물기원 휘발성유기 화합물은 온난화와 더불어 그 농도가 더욱 증가할 것으로 예측되므로 되먹임작용에 대한 이해는 필수적이다.

VOCs는 O_3 이 광분해되면서 만들어진 OH 라디칼과 O_3 , NO_x 등에 의해 산화되는데 그 과정에서 O_3 이 재생성되고 이와 더불어 에어로졸($\text{PM}_{2.5}$)이 생성된다(그림 14). VOCs는 종류와 농도의 범위가 다양하여 최근에 와서야 측정 기술의 발전과 더불어 좀 더 정확한 측정이 가능해졌다. 특히 BVOCs는 인위적기원 휘발성유기화합물(AVOCs)에 비해 그 중요성이 늦게 알려졌다. 1960년 식물에서 방출되는 휘발성 유기물질들, 그 중에서도 특히 모노테르페노이드(monoterpenoids, $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$)는 광화학 반응을 통해서 에어로졸을 생성할 수 있으며 이러한 작용은 여름철 산림지역에서 흔히 관찰되는 ‘파랑 연무(blue haze)’의 원인으로 지목되었다(Went, 1960). 이후 1988년 오존 생성에 BVOCs (특히 이소프렌 isoprene, C_5H_8)이 중요한 역할을 하고 있음이 밝혀졌다(Chameides et al., 1988). 전 지구적인 규모에서 BVOCs는 AVOCs에 비해 배출량이 10배 이상 크며 반응성도 더 크기 때문에 광화학 오존 생성에 대한 이해를 더하는 데에 획기적인 계기가 되었다.

BVOCs의 대표적인 종인 이소프렌은 활엽수의 광합성 과정에서 생성되는데 생체 내에 저장되지 않고 바로 밖으로 배출되며, 침엽수에서는 테르펜(terpene) 종들이 생성된다(Fuentes et al., 2000). 이들의 배출은 빛과 온도에 의해 민감하며 식생의 종, 연령 그리고 지역 환경에 따라 달라 지므로 정확한 배출량의 산정은 AVOCs보다 훨씬 어렵다. 따라서 BVOCs 배출량 산정을 위해 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)과 같은 모델링 시스템이 개발되어 사용되고 있다(Gunether et al., 2006). 이들 물질이 인위적인 활동에서 배출되는 NO_x 와 섞일 경우 오존이 생성되며 에어로졸 또한 생성량이 증가 하는 것으로 보고되었다.

그러나 이러한 복잡한 과정에 대기 중 오존과 이차유기 에어로졸 (secondary organic aerosol, SOA)의 생성과 변화 과정에 대한 이해가 아직 매우 부족한 실정이다. 이는 결국

기후변화 대응과 대기환경 개선을 위한 정책 수립 시 큰 불확도를 제공하는 원인이 되므로 이에 대한 연구가 매우 절실하다. 따라서 식생으로부터 이들의 배출 특성과 정확한 배출량 그리고 대기 중 변환 기작에 대한 이해를 위한 연구가 현재 활발하게 진행되고 있다. 이는 특히 지구환경과학 분야의 국제적 협력과 문제 해결을 도모하기 위한 미래지구(Future Earth)의 주요 프로그램인 iLEAPS의 핵심 주제이기도 하다(<http://www.ileaps.org>). 식생과 대기의 물질교환과 상호작용 그리고 대기 중 변환과 생지화학순환을 통해 궁극적으로 기후에 미치는 영향을 이해하는 것을 주요 목적으로 한다.

우리나라는 산림이 국토의 대부분을 차지하며, 서울을 비롯한 주요 도심지역은 녹지 면적이 더 크다. 국립환경과학원의 2005년 배출량 통계에서 AVOC와 BVOCs의 연 배출은 각각 723,000톤과 431,000톤으로 BVOCs가 전체 배출의 약 40%를 차지한다. 그러나 이러한 추정값은 기존의 모형을 활용해 산출된 것이어서 BVOCs의 농도와 배출 및 광화학 과정에 대한 이해는 매우 미흡한 실정이다. 이러한 필요성을 인식하여 국립환경과학원에서는 생태계와 대기사이의 상호 교환 작용과 오존 및 에어로졸 생성에 대한 영향을 종합적으로 이해하고, 그 기작을 구명하기 위해 수도권에 위치한 서울대학교 학술림에 대기관측소와 타워를 설치하여 연구를 수행하고 있다(국립환경과학원, 2014).

태화산에서 BVOCs의 농도는 여름철 특히 6월에 가장 높았으며, 이소프렌은 늦은 오후에 그리고 모노테르펜은 밤에 농도의 최고값이 나타났는데(Kim et al., 2013; 김학영 외, 2015), 이소프렌은 낮 시간 O_3 생성에 영향을 미치고, 모노테르펜은 밤시간의 O_3 소멸에 기여하는 것으로 보고되었다(An, et al., 2019). 이러한 BVOCs의 역할은 NO_x 순환과 연동되어 peroxyacetyl nitrate(PAN)도 도시 수준으로 높았다(Gil et al., 2018). 특히 국립환경과학원과 미국항공우주국의 한미대기환경합동조사인 KORUS-AQ 캠페인에서는 태화산이 서울의 풍하 지역으로 측정이 수행되었는데 자연 배출원의 영향과 더불어 주변 오염물질의 영향을 크게 받아 O_3 과 PAN이 모두 높아진 것으로 나타났다(Rhee et al., 2019). 이 BOVCs는 5~6월에는 O_3 뿐 아니라 $PM_{2.5}$ 중 이차 OC 생성에도 기여한 것으로 보고되었고 다른 계절과는 달리 오후에 뚜렷한 피크를 보이는 것으로 보고되었다(Ham et al., 2019). 식생에

의한 에어로졸 생성 기여는 탄소동위원소(^{14}C) 분석으로 규명이 가능한데 여름 8월의 태화산 $PM_{2.5}$ 의 총탄소(TC) 중 비화석 연료의 기여가 약 75 %에 이르렀다(Lim et al., 2018).

현재 우리나라는 미세먼지가 국가의 핵심 이슈로 대두되어 미세먼지를 저감하기 위한 연구와 대책을 마련 중에 있으며, 중앙 정부와 지자체를 중심으로 도시숲 조성을 확대하려는 계획을 추진 중에 있다. 이에 따라 산림청과 국립산림과학원에서도 BVOCs에 대한 연구에 더 많은 노력을 기울이고 있다. 도시숲은 기후변화 적응 측면에서 효과가 큰 것으로 받아들여지고 있으나 가뭄이나 고온이 지속되는 경우 BVOCs 배출이 증가할 것이므로 이에 따른 되먹임 효과를 예측하기가 어렵다. 그리고 BVOCs는 주변에서 배출되는 NO_x 나 SO_2 와 섞일 때 오존과 미세먼지를 잘 생성할 수 있다. 따라서 BVOCs가 다양한 조건에서 오존과 미세먼지를 생성하는 상세 기작을 연구하고 그 결과에 근거한 과학적 정책이 수립되어야 한다. 오존과 미세먼지 통합 그리고 대기질과 기후변화 통합 측면에서 반응성 탄소, 질소, 황 물질의 종합적이고 장기적인 생지화학순환 연구가 필요하다.

5.4. 결론

「한국 기후변화 평가보고서 2014」에서 이미 언급된 바와 같이, 탄소순환과 기타 생지화학순환을 다룬 IPCC 5차 평가보고서의 경우, CO_2 , CH_4 , N_2O 의 생지화학순환에 미치는 현재의 인위적인 교란과 더불어, 기후 변동과 결합되어 이러한 생지화학순환이 어떻게 변화하여 왔는지, 그리고 미래 시나리오에 따라 앞으로 어떻게 진화해 갈 것인지에 대하여 다루고 있다. 그러나 이와 관련하여 그동안 국내에서 수행되었거나 또는 현재 진행되고 있는 연구결과를 요약, 보완한 본 장에서는 많은 국내 연구가 이미 중단되었거나 또는 비교적 최근에 시작되었거나, 또는 다양한 관측 자료의 축적에도 불구하고 메타 자료의 부재로 분석이 어렵거나 아직 분석이 진행 중이어서 보고가 되지 않은 경우가 많았다. 또한 연구의 대부분이 국지적이고, 산발적인 단기 관측과 과정 수준의 연구가 대부분이고, 일부 모델링/알고리즘의 개발 및 비교 검증과 기계학습 기반의 관측-모델링 융합의

예비단계 연구 등으로 제한되어 있다.

2014년 보고서 이후 5년이 지난 지금도 여전히 국내에서 자체 생산된 연구 결과가 턱없이 부족할 뿐 아니라, 국제적인 프로그램의 자발적인 참여를 통한 연구력 제고를 통해 지속되고 있는 일부 관측 연구를 제외하고는 대부분의 생지화학순환 관련 관측은 오히려 퇴보한 것으로 보인다.

본 보고서에서는 장기적인 국내 자료와 종합적인 학제간/초학문 연구의 결여로 인해 IPCC 5차 평가보고서와 비교할 만한 결과를 제시하지는 못하였으나, 해당되는 IPCC 5차 평가보고서의 핵심 요약과 비교하여 아래와 같이 요약할 수 있다.

산업시대의 인위적 교란: 화석연료의 연소와 토지 사용의 변화로 인한 CO₂ 방출의 증가가 관측된 대기 중 CO₂ 농도 증가의 주요 원인이다(견고한 동의). 관측에 의하면, 1990년 초반부터 십년간 안정되었던 CH₄ 농도가 2007년부터 다시 증가함을 보이고 있다(중간적 동의). 국내 논에서의 메탄 배출량이 과소평가된 것으로 보고되어 배출계수의 제고가 필요하다. N₂O의 농도가 지난 30년 동안 0.73±0.03 ppb/년의 증가율을 보였다(중간적 동의). 인위적인 2010년의 반응성 질소의 생성은 자연적인 육상생태계의 생성율보다 적어도 두 배 이상 크다(중간적 동의). N₂O의 경우 국내 관측 자료도 비슷한 크기의 범위를 보인다.

미래 예측: 기후변화는 증가하는 대기 중 CO₂에 의해 야기된 전 지구 육상생태계의 탄소 흡원을 부분적으로 상쇄시킬 것이다(견고한 동의). 영양소의 부족이 증가하는 대기 중 CO₂가 미래 육상탄소 흡원에 미치는 효과를 제한할 것이다(견고한 동의). 이와 관련하여, 국내 산림생태계가 인위적인 CO₂ 방출의 약 3% 정도를 흡수하는 것으로 추정되나 임령 증가와 간벌 및 토지사용 변화 등에 의해 그 흡원의 강도가 감소할 것으로 예상된다. 그러나 제5차와 제6차 국가산림자원 조사에 대한 다양하고 심도 깊은 연구와 관측 및 모델링의 연계가 앞으로의 산림관리 전략과 새로운 조림 수종 제안에 이용되고 있다. 또한 중장령림에 대한 관리와 재조림 이후에 초기 산림 작업이 탄소순환에 미치는 영향에 대한 연구의 고도화가 진행되고 있어 고무적이다. 습지생태계로부터의 메탄 방출은 증가하는 CO₂와 따뜻한 기후로 인해 더 증가

할 것이다(중간적 동의). 토양으로부터의 N₂O 방출은 늘어나는 부양/식량 및 농업의 질소비료 의존도 때문에 증가할 것이다(중간적 동의). 국내 연구 결과도 이를 뒷받침한다.

인위적인 방출의 비가역적 장기적 영향: 육상의 물리적, 생지화학적 탄소순환은 21세기 동안 야기될 대기 중 CO₂의 증가와 기후변화에 반응을 계속할 것이다(견고한 동의). 국내 하천의 유기 및 무기 탄소 유출량은 연간 총 905 Gg C으로 한국 산림의 NEP 추정값(3,510 Gg C)의 1/4에 이른다. 한강 유역의 하천과 호소의 경우, CO₂와 CH₄은 유기물이 많이 축적된 호소 퇴적층과 하수처리장의 영향을 많이 받는 한강 하류와 그 지류에서 다량 배출되고 있는 것으로 나타났다.

기후변화와 CO₂ 증가에 따른 지표 탄소의 흡수 및 배출의 변화와 분포를 모니터링하기 위해 개발된 아시아 탄소추적 시스템의 경우, 자료동화 모수의 최적화와 항공 및 위성 자료의 동화 체계를 새로이 구축하여 인버스 모델링과 관측 기반의 추정값 간의 비교를 통해 개선된 지표 CO₂ 플럭스 추정값을 제시하였다. 또한 시베리아 관측 자료의 중요성과 더불어, 불확도가 큰 아시아 지역에 더 많은 관측지가 필요함을 지적하였다.

5.5. 참고문헌

- 강남구, 유주열, 아산탈록더, 문민규, 강민석, 심교문, 김준, 2015: 개회로 파장 변조 분광법과 에디 공분산 방법으로 논에서 관측된 CH₄ 플럭스 자료의 보정, *한국농림기상학회지*, 17, 15-24.
- 강민석, 김준, 이승훈, 김종호, 천정화, 조성식, 2018: 표준화된 KoFlux 에디 공분산 자료 처리 방법의 변화와 개선, *한국농림기상학회지*, 20, 5-17.
- 국립환경과학원, 2014: 자연적 휘발성 유기화합물이 오존 및 유기에어로졸에 미치는 영향연구(IV), *NIER-SP2014-18*.
- 권기범, 한희, 설아라, 정혜진, 정주상, 2016: 거리독립 생장 예측 시뮬레이션기법 적용에 의한 삼나무임분의 임분 생장 및 탄소고정에 미치는 간벌시업 효과 분석. *한국*

- 산림과학회지, 105(1), 132-138.
- 극지연구소, 2018: 환북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용기술 개발, *해양극지/초원천기술개발사업 보고서*.
- 김경민, 이정빈, 정재훈, 2015: 임상도와 Landsat TM 위성 영상을 이용한 산림탄소저장량 추정 방법 비교 연구. *대한원격탐사학회지*, 31(5), 449-459.
- 김기용, 정성민, 최영순, S. Peiffer, K. -H. Knorr, 김범철, 2018: 아시아 몬순 기후지역에 위치한 대형 인공호에서 기포형태로의 메탄(CH₄) 가스 배출량, *생태와 환경*, 51(2), 160-167.
- 김성준, 이종열, 한승현, 장한나, 이소혜, 윤현민, 손요환, 2016: 흰개미가 생태계 탄소 순환에 미치는 영향: 고사목 분해를 중심으로. *한국산림과학회지*, 105(1), 1-11.
- 김은숙, 이지선, 박고은, 임종환, 2019: 아고산 침엽수림 분포 면적의 20 년간 변화 분석. *한국산림과학회지*, 108(1), 10-20.
- 김진웅, 김현미, 조천호, 2012: 양상불 칼만 필터 기반 탄소 추적시스템의 아시아 지역 탄소 순환 진단에의 적용, *한국기상학회 대기*, 22(4), 415-427.
- 김학영, 이미혜, 김세웅, 알렉스 B. 겐터, 박정민, 조강남, 김현석, 2015: 경기도 태화산에서 isoprene과 monoterpenes 측정 및 배출량 산정, *한국농림기상학회지*, 17(3), 217-226.
- 김현미, 심창섭, 김준 등, 2018: 지상, 위성관측, 자료동화 기반의 탄소추적시스템 성능향상 기술 개발 보고서.
- 김현정, 김현미, 김진웅, 조천호, 2016: 인버스 모델링 방법을 통해 진단된 대기 중 이산화탄소 농도와 항공 관측 자료 비교, *한국기상학회 대기*, 26(3), 387-400.
- 김현정, 김현미, 조민광, 박준, 김대휘, 2018: 인버스 모델링을 이용한 지표면 이산화탄소 플럭스 추정 향상을 위한 항공기 관측 이산화탄소 자료동화 체계 개발, *한국기상학회 대기*, 28(2), 1-9.
- 김현준, 한승현, 김성준, 장한나, 손요환, 2018: 토양 내 인위적인 이산화탄소 누출에 따른 소나무와 굴참나무 묘목의 엽록소 함량과 생장 반응. *한국산림과학회지*, 107(4), 351-360.
- 문가현, 임종수, 신만용, 2018: 국가산림자원조사 자료를 이용한 소나무의 진계생장 추정식 개발. *한국산림과학회지*, 107(4), 402-411.
- 박형근, 옥기영, 2017: 수질측정망을 이용한 국내 대하천 하구를 통한 총유기탄소 유출량 산정과 비교, *한국환경생물학회지*, 35(4), 549-556.
- 송수진, 장경수, 황인채, 안기완, 이계한, 2016: 소나무 유령림의 임목밀도 조절이 탄소 동태에 미치는 영향. *한국산림과학회지*, 105(3), 275-283.
- 손영모, 전주현, 이선정, 임종수, 강진택, 2017: 우리나라 침엽수 및 활엽수림의 고사율 추정식 개발. *한국산림과학회지*, 106(4), 450-456.
- 서연옥, 정성철, 이영진, 2017: 국가산림자원조사 자료와 임상도를 활용한 리기다소나무림의 탄소 저장량에 대한 공간분포도 작성: 무주군의 사례로. *한국산림과학회지*, 106(2), 258-266.
- 심교문, 민성현, 김용석, 정명표, 최인태, 2015: 김제 보리-벼 이모작지에서의 순 생물상생산량의 추정, *한국농림기상학회지*, 17, 173-181.
- 심교문, 민성현, 김용석, 정명표, 최인태, 강기경, 2016: 국내 벼-보리 이모작지와 벼 단작지의 탄소수지 비교, *한국농림기상학회지*, 18, 337-347.
- 심교문, 민성현, 김용석, 정명표, 최인태, 강기경, 2016: 국내 사과원 생태계에서 CO₂의 연간 순생태 교환량 추정, *한국농림기상학회지*, 18, 348-356.
- 안지애, 한승현, 장한나, 박민지, 손요환, 2016: 실외 실험적 온난화 처리에 따른 활엽수 4 개 수종 묘목의 생리적 반응. *한국산림과학회지*, 105(4), 510-516.
- 오능환, 2016: 하천 탄소의 유출량과 생지화학적 특성, *생태와 환경*, 49(4), 245-257.
- 이민규, 권보람, 김성근, 윤태경, 손요환, 이명중, 2019: 일본 앞길나무와 리기다소나무 고사목의 호흡속도: 고사목의 부후등급과 이화학적 특성의 영향. *한국산림과학회지*, 108(1), 40-49.
- 온실가스 종합정보센터, 2016: 국가 온실가스 인벤토리 보고서.
- 이보라, 장근창, 김은숙, 강민석, 천정화, 임종환 2019: 머신러닝 기법의 산림 총일차생산성 예측 모델 비교, *한국농림기상학회지*, 21, 29-41.
- 이선일, 김건엽, 최은정, 이종식, 정현철, 2018: 휴경기간

- 녹비재배 농경지 토양에서 아산화질소 및 이산화탄소 배출특성, *한국농림기상학회지*, 20, 386-396.
- 이승훈, 강민석, 강남구, 김준, 2018: 해남 무논점파 논 KoFlux (HPK) 관측지: 소개, *한국농림기상학회지*, 20, 18-33.
- 이종열, 한승현, 김성준, 이소혜, 손영모, 손요환, 2015: 국내 산림의 간벌에 따른 직경 생장량 및 탄소 저장량 변화에 관한 메타 분석. *한국산림과학회지*, 104(4), 527-535.
- 임중환, 성주한, 천정화, 신만용, 2016: 기후인자가 일본잎 갈나무의 연륜생장에 미치는 영향 분석. *한국산림과학회지*, 105(1), 122-131.
- 임중환, 천정화, 박고은, 신만용, 2016: 기후변화가 잣나무의 연륜생장에 미치는 영향 분석, *한국산림과학회지*, 105(3), 351-359.
- 임중환, 박고은, 문나현, 문가현, 신만용, 2017: 국가산림 자원조사 자료를 활용한 소나무 연륜생장과 기후인자와의 관계분석. *한국산림과학회지*, 106(2), 249-257.
- 정수영, 주남규, 이광수, 유병오, 박용배, 유석봉, 박준형, 2015: 불가시나무림의 속아베기 강도에 따른 생장 반응 효과. *한국산림과학회지*, 104(4), 536-542.
- 조선희, 박종영, 박정호, 이양근, 문이만, 강상호, 김광현, 윤종국, 2015: 종 분포 모형을 이용한 구상나무림의 지속 및 쇠퇴에 관한 연구-전라남도 광양시 백운산을 중심으로. *한국산림과학회지*, 104(3), 360-367.
- 주옥정, 김준, 박중수, 강창성, 2018: 농경지 온실가스 배출 산정을 위한 챔버법: 고찰, *한국농림기상학회지*, 20, 34-46.
- 차세대도시·농림융합기상사업단, 2017: 차세대 도시·농림 융합 스마트 기상서비스 개발사업 최종보고서.
- 최성원, 김학영, 김연옥, 강민석, 김준, 2016: 수정된 물관리 보정인자를 적용한 경기도 논에서의 메탄 배출량 산정과 지도화. *한국농림기상학회지*, 18, 320-326.
- 최성원, 김준, 강민석, 이승훈, 강남구, 심교문 2018: 전국 논에서 발생하는 메탄 배출량의 산정 및 지도화: 지역 격차 및 특성 분석, *한국농림기상학회지*, 20, 88-100.
- 최은진, 서희영, 이광수, 유병오, 김춘식, 조현서, 2016: 소나무재선충병 발생 곰솔임분의 간벌에 따른 토양 호흡 동태. *한국산림과학회지*, 105(1), 12-18.
- 표정기, 손영모, 2017: 임의효과를 이용한 충남지역 소나무림의 바이오매스 모형 개발. *한국산림과학회지*, 106(2), 213-218.
- 한승현, 장한나, 손요환, 2018: 인위적 온난화 및 강수 조절에 따른 소나무 묘목 세균 생산량과 고사율의 계절적 변화. *한국산림과학회지*, 107(1), 43-49.
- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), 2017: Snow, water, ice and permafrost. Summary for policy-makers. *Report on Arctic Monitoring and Assessment Programme*, Oslo, Norway.
- An, H., M. Lee, H. Kim, Sawung Kim, A. Guenther, H. Kim, J. Park, S. Kim, H. Park, and S. Lee, 2019: Seasonal and vertical variations of O₃ with respect to BVOCs observed in Taehwa research forest near Seoul metropolitan area during 2011-2014, *Science of the Total Environment*, Submitted.
- An, J. Y., B. B. Park, B. B., J. H. Chun, and A. Osawa, 2017: Litterfall production and fine root dynamics in cool-temperate forests. *PloS One*, 12(6), e0180126.
- Bastviken, D., L. J. Tranvik, J. A. Downing, P. M. Crill, and A. Enrich-Prast, 2011: Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink, *Science*, 331, 50.
- Beaulieu, J. J., J. L. Tank, S. K. Hamilton, W. M. Wollheim, R. O. Hall, P. J. Mulholland, B. J. Peterson, L. R. Ashkenas, L. W. Cooper, C. N. Dahm, W. K. Dodds, N. B. Grimm, S. L. Johnson, W. H. McDowell, G. C. Poole, H. M. Valett, C. P. Arango, M. J. Bernot, A. J. Burgin, C. L. Crenshaw, A. M. Helton, L. T. Johnson, J. M. O'Brien, J. D. Potter, R. W. Sheibley, D. J. Sobota, and S. M. Thomas, 2011: Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(1), 214-219.
- Billings, W. D. and H. A. Mooney, 1968: The ecology of arctic and alpine plants, *Biological Reviews*, 43, 481-529.
- Brown, J., and V. Romanovsky, 2008: Report from the International Permafrost Association: state of permafrost in the first decade of the 21st century, *Permafrost Periglacial Process*, 19, 255-60.
- Cha, J. Y., Y. Cha, and N. H. Oh, 2019: The effects of tree species on soil organic carbon content in south

- Korea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(3), 708-716.
- Cha, S., H. M. Chae, S. H. Lee, and J. K. Shim, 2017: Branch wood decomposition of tree species in a deciduous temperate forest in Korea. *Forests*, 8(5), 176.
- Chae, N. H., Kang, Y. W. Kim, S. G. Hong, B. Y. Lee, and T. J. Choi, 2016a: CO₂ efflux from the biological soil crusts of the High Arctic in a later stage of primary succession after deglaciation, Ny-Ålesund, Svalbard, Norway. *Applied Soil Ecology*, 98, 92-102.
- Chae, N. H., H. K. Yang, B. Y. Lee, Lee, C. K., 2016b: Measurement of environmental parameters in polar regions based on a ubiquitous sensor network. *Cold Regions Science and Technology*, 123, 22-31.
- Chameides, W. L., R. W. Lindsay, J. Richardson, and C. S. Kiang, 1988: The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science*, 241, 1473-1475.
- Cho, C. H., 2013: A tool to quantify global CO₂ uptake/release in Asia. *Global Strategy Center Greenable*, 2, 8-13.
- Choi, J., and An, H., 2016: A forest growth model for the natural broadleaved forests in northeastern Korea. *Forests*, 7(11), 288.
- Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg, and J. Melack, 2007: Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget, *Ecosystems*, 10, 171-184.
- Davidson, E. A., and D. Kanter, 2014: Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letter*, 9:105012.
- Dinerstein, E., D. Olson, A. Joshi, C. Vynne, N. D. Burgess, E. Wikramanayake, N. Hahn, S. Palminteri, P. Hedao, R. Noss, M. Hansen, H. Locke, E. C. Ellis, B. Jones, C. V. Barber, R. Hayes, C. Kormos, V. Martin, E. Crist, W. Sechrest, Lori Price, Jonathan E. M. Baillie, D. Weeden, K. Suckling, C. Davis, N. Sizer, R. Moore, D. Thau, T. Birch, P. Potapov, S. Turubanova, A. Tyukavina, N. de Souza, L. Pintea, J. C. Brito, O. A. Llewellyn, A. G. Miller, A. Patzelt, S. A. Ghazanfar, J. Timberlake, H. Klöser, Y. Shennan-Farpón, R. Kindt, J. B. Lillesø, P. van Breugel, L. Gaudal, M. Voge, K. F. Al-Shammari, and M. Saleem 2017: An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm, *BioScience*, 67, 534-545.
- Elvebakk, A., R. Elven, and V. Y. Razzhivin, 1999. Delimitation, zonal and sectorial subdivision of the Arctic for the Panarctic Flora Project. In: Nordal, I. and Razzhivin, V. Y. (eds.) The species concept in the High North - A Panarctic Flora Initiative, pp. 375-386. *The Norwegian Academy of Science and Letters*, Oslo, NO
- Fuentes, J. D., M. Lerdau, R., Atkinson, D. Baldocchi, J. W. Bottenheim, P. Ciccioli, B. Lamb, C. Geron, L. Gu, A. Guenther, T. D. Sharkey, and W. Stockwell, 2000: Biogenic hydrocarbons in the atmospheric boundary layer: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81, 1537-1575.
- Gim, H. J., S. K. Park, M. Kang, B. M. Thakuri, J. Kim, and C. H. Ho, 2017: An improved parameterization of the allocation of assimilated carbon to plant parts in vegetation dynamics for Noah-MP, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9, 1776-1794.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geronet, 2006: Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210.
- Ham, J., S. Lim, M. Lee, H. Kim, S. Kim, S. Lee, and S. Kim, 2019: EC as a tracer for seasonal haze occurrence at Taehwa research forest near Seoul metropolitan areas, *Journal of Hazardous Materials*, submitted.
- Han, S. H., S. Yun, J. Lee, S. Kim, H. Chang, and Y. Son, 2016: Estimating the production and mortality of fine roots using minirhizotrons in a *Pinus densiflora* forest in Gwangneung, Korea. *Journal of Forestry*

- Research*, 27(5), 1029-1035.
- Han, S. H., Meng, L., Park, G. S., Kim, S. B., Cho, M. S., and Park, B. B., 2017: Characteristics of soil carbon and nutrient stocks across land use types in a forest region of central Korea. *Forest Science and Technology*, 13(3), 93-99.
- Han, S. H., S. Kim, H. Chang, H. J. Kim, A. Khamzina, and Y. Son 2019: Soil depth-and root diameter-related variations affect root decomposition in temperate pine and oak forests. *Journal of Plant Ecology*, 12, 871-881
- Huang, Y., Y. Ryu, C. Jiang, H. Kimm, S. Kim, M. Kang, and K. Shim, 2018: BESS-Rice: A remote sensing derived and biophysical process-based rice productivity simulation model, *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257, 253-269.
- Hugelius, G., J. Strauss, S. Zubrzycki, J. W. Harden, E. A. G. Schuur, C. -L. Ping, L. Schirrmeter, G. Grosse, G. J. Michaelson, C. D. Koven, J. A., O'Donnell, B. Elberling, U. Mishra, P. Camill, Z. Yu, J. Palmtag, and P. Kuhry, 2014: Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps, *Biogeosciences*, 11, 6573-6593.
- Ichii, K., M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. C. Alberto, J. Ardö, E. S. Euskirchen, M. Kang, T. Hirano, J. Joiner, H. Kobayashi, L. B. Marchesini, L. Merbold, A. Miyata, T. M. Saitoh, K. Takagi, A. Varlagin, M. S. Bret-Harte, K. Kitamura, Y. Kosugi, A. Kotani, K. Kumar, S. G. Li, T. Machimura, Y. Matsuura, Y. Mizoguchi, T. Ohta, S. Mukherjee, Y. Yanagi, Y. Yasuda, Y. Zhang, and F. Zhao, 2017: New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122, 767-795.
- Indrawati, Y. M., J. Kim, and M. Kang, 2018: Assessment of ecosystem productivity and efficiency using flux measurement over Haenam farmland site in Korea (HFK), *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 20, 57-72.
- IPCC (Intergov. Panel Clim. Change), 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, eds. T. F. Stocker, D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, et al. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press
- Jiang, C., and Y. Ryu, 2016: Multi-scale evaluation of global gross primary productivity and evapotranspiration products derived from Breathing Earth System Simulator (BESS), *Remote Sensing of Environment*, 186, 528-547.
- Jiang, C., Y. Ryu, H. Fang, R. Myneni, M. Claverie, and Z. Zhu, 2017: Inconsistencies of interannual variability and trends in long-term satellite leaf area index products, *Global Change Biology*, 23, 4133-4146.
- Jin, H., T. K. Yoon, M. S. Begum, E. -J. Lee, N. -H. Oh, N. Kang, and J. -H. Park, 2018: Longitudinal discontinuities in riverine greenhouse gas dynamics generated by dams and urban wastewater, *Biogeosciences*, 15, 6349-6369.
- Jin, H., T. K. Yoon, S. -H. Lee, H. Kang, J. Im, and J. -H. Park, 2016: Enhanced greenhouse gas emission from exposed sediments along a hydroelectric reservoir during an extreme drought event, *Environmental Research Letters*, 11, 124003.
- Jung, B. J., J. K. Lee, H. Kim, and J. H. Park, 2014: Export, biodegradation, and disinfection byproduct formation of dissolved and particulate organic carbon in a forested headwater stream during extreme rainfall events, *Biogeosciences*, 11, 6119-6129.
- Jung, B.-J., L. Jeanneau, C. Alewell, B. Kim, and J.-H. Park, 2015: Downstream alteration of the composition and biodegradability of particulate organic carbon in a mountainous, mixed land-use watershed, *Biogeochemistry*, 122, 79-99.
- Jung, J. Y., K. Lee, H. S. Lim, H. Kim, E. J. Lee, and Y. K. Lee, 2014: Soil organic carbon characteristics relating to geomorphology near Vestre Lovénbreen moraine in Svalard, *Journal of Ecological Environment*, 37, 69-79.

- Kang, M., B. L. Ruddell, C. Cho, J. Chun, and J. Kim, 2017: Identifying CO₂ advection on a hill slope using information flow, *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 265-278.
- Kang, M., J. Kim, B. Malla Thakuri, J. Chun, and C. Cho, 2019: Modification of the moving point test method for nighttime eddy CO₂ flux filtering on hilly and complex terrains, *MethodsX*, 6, 1207-1217.
- Kim, C., B. O. Yoo, S. Y. Jung, and K. S. Lee, 2017: Allometric equations to assess biomass, carbon and nitrogen content of black pine and red pine trees in southern Korea. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 10(2), 483.
- Kim, C., S. Kim, G. Baek, and A. R. Yang, 2019a: Carbon and nitrogen responses in litterfall and litter decomposition in red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) stands disturbed by pine wilt disease. *Forests*, 10(3), 244.
- Kim, C., G. Baek, B. O. Yoo, S. Y. Jung, K. S. Lee, and K. W. An, 2019b: Comparison of allometric equations and biomass expansion factors for six evergreen broad-leaved trees in subtropical forests in southern Korea. *Journal of Sustainable Forestry*, 38(3), 199-212.
- Kim, H., H. M. Kim, J. Kim, and C.-H. Cho, 2018a: Effect of data assimilation parameters on the optimized surface CO₂ flux in Asia, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54, 1-17.
- Kim, H., S. Kim, J. Lee, H. Chang, Y. Roh, J. An, and Y. Son, 2019: Development of a forest carbon and nitrogen model: Pilot application for a *Pinus densiflora* forest in Central Korea, *Forest Science and Technology*, 15(4), 202-209.
- Kim, J., H. M. Kim, and C.-H. Cho, 2014a: The effect of optimization and the nesting domain on carbon flux analyses in Asia using a carbon tracking system based on the ensemble Kalman filter, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50, 327-344.
- Kim, J., H. M. Kim, and C.-H. Cho, 2014b: Influence of CO₂ observations on the optimized CO₂ flux in an ensemble Kalman filter, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 13515-13530.
- Kim, J., H. M. Kim, C.-H. Cho, K.-O. Boo, A. R. Jacobson, M. Sasakawa, T. Machida, M. Arshinov, and N. Fedoseev, 2017: Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 2881-2899.
- Kim, K., B. Kim, K. Knorr, J. Eum, Y. Choi, S. Jung, and S. Peiffer, 2016: Potential effects of sediment processes on water quality of an artificial reservoir in the Asian monsoon region, *Inland Waters*, 6(3), 423-435.
- Kim, M., F. Kraxner, Y. Son, S. W. Jeon, A. Shvidenko, D. Schepaschenko, B. -Y. Ham, C. -H. Lim, C. Song, M. Hong, and W. K. Lee, 2019c: Quantifying impacts of national-scale afforestation on carbon budgets in South Korea from 1961 to 2014. *Forests*, 10(7), 579.
- Kim S., C. Kim, S. H. Han, S. -T. Lee, and Y. Son, 2018b: A multi-site approach toward assessing the effect of thinning on soil carbon contents across temperate pine, oak, and larch forests. *Forest Ecology and Management*. 424, 62-70
- Kim, S., T. K. Yoon, S. Han, S. H. Han, J. Lee, C. Kim, ... and Y. Son, 2015: Initial effects of thinning on soil carbon storage and base cations in a naturally regenerated *Quercus* spp. forest in Hongcheon, Korea. *Forest Science and Technology*, 11(3), 172-176.
- Kim, S., G. Li, S. H. Han, H. J. Kim, C. Kim, S. T. Lee, and Y. Son, 2018c: Thinning affects microbial biomass without changing enzyme activity in the soil of *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc. forests after 7 years. *Annals of Forest Science*, 75(1), 13.
- Kim, S., G. Li, S. H. Han, C. Kim, S.-T. Lee, and Y. Son, 2019d: Microbial biomass and enzymatic responses to temperate oak and larch forest thinning: Influential factors for the site-specific changes. *Science of the Total Environment*. 651, 20682079.
- Kim, S.-Y., X. Jiang, M. Lee, A. Turnipseed, A. Guenther, J.-C. Kim, S.-J. Lee, and S. Kim, 2013: Impact of biogenic volatile organic compounds on ozone production at

- the Taehwa Research Forest near Seoul, South Korea, *Atmospheric Environment*, 70, 447-453.
- Kim, Y., M. S. A. Talucder, M. Kang, K. M. Shim, N. Kang, and J. Kim, 2016: Interannual variations in methane emission from an irrigated rice paddy caused by rainfalls during the aeration period, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 223, 67-75.
- Kim, Y., K. Nishina, N. Chae, S. J. Park, Y. J. Yoon, and B. Y. Lee, 2014: Constraint of soil moisture on CO₂ efflux from tundra lichen, moss, and tussock in Council, Alaska, using a hierarchical Bayesian model, *Biogeosciences*, 11, 5567-5579.
- Kim, Y., 2015: Effect of thaw depth on fluxes of CO₂ and CH₄ in manipulated Arctic coastal tundra of Barrow, Alaska, *Science of the Total Environment*, 505, 385-389.
- Kim, Y., B. Y. Lee, R. Suzuki, and K. Kushida, 2016a: Spatial characteristics of ecosystem respiration in three tundra ecosystems of Alaska, *Polar Science*, 10, 3, 356-363.
- Kim, Y., S. J. Park, B. Y. Lee, and D. Risk, 2016b: Continuous measurement of soil carbon efflux with forced diffusion (FD) chambers in a tundra ecosystem of Alaska, *Science of the Total Environment*, 566-567, 175-184.
- Kwon, M. J., M. Heimann, O. Kolle, K. A. Luus, E. A. G. Schuur, N. Zimov, and M. Göckede, 2016: Long-term drainage reduces CO₂ uptake and increase CO₂ emission on a Siberian floodplain due to shifts in vegetation community and soil thermal characteristics. *Biogeosciences*, 13, 4219-4235.
- Kwon, M. J., F. Beulig, I. Ilie, M. Wildner, K. Küsel, L. Merbold, M. D. Mahecha, N. Zimov, S. A. Zimov, M. Heimann, E. A. G. Schuur, J. E. Kostka, O. Kolle, I. Hilke, and M. Göckede, 2017: Plants, microorganisms, and soil temperatures contribute to a decrease in methane fluxes on a drained Arctic floodplain, *Global Change Biology*, 23, 2396-2412.
- Kwon, M. J., S. M. Natali, C. E. Hicks Pries, E. A. G. Schuur, A. Steinhof, K. G. Crummer, N. Zimov, S. A. Zimov, M. Heimann, O. Kolle, and M. Göckede, 2019a: Drainage enhances modern soil carbon contribution but reduces old soil carbon contribution to ecosystem respiration in tundra ecosystems, *Global Change Biology*, 25, 1315-1325.
- Kwon, M. J., J. Y. Jung, B. M. Tripathi, M. Gockede, Y. K. Lee, and M. Kim, 2019b: Dynamics of microbial communities and CO₂ and CH₄ fluxes in the tundra ecosystems of the changing Arctic *Journal of Microbiology*, 57, 325-336.
- Kritee, K., D. Nair, D. Zavala-Araiza, J. Proville, J. Rudek, T. K. Adhya, T. Loecke, T. Esteves, S. Balireddygar, O. Dava, K. Ram, S. R. Abhilash, M. Madasamy, R. V. Dokka, D. Anandaraj, D. Athiyaman, M. Reddy, R. Ahuja, and S. P. Hamburg, 2018: High nitrous oxide fluxes from rice indicate the need to manage water for both long- and short-term climate impacts, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115, 9720-9725.
- Quéré, C. L., R. M. Andrew, P. Friedlingstein, S. Sitch, J. Pongratz, A. C. Manning, J. I. Korsbakken, G. P. Peters, J. G. Canadell, R. B. Jackson, T. A. Boden, P. P. Tans, O. D. Andrews, V. K. Arora, D. C. E. Bakker, L. Barbero, M. Becker, R. A. Betts, L. Bopp, F. Chevallier, L. P. Chini, P. Ciais, C. E. Cosca, J. Cross, K. Currie, T. Gasser, I. Harris, J. Hauck, V. Haverd, R. A. Houghton, C. W. Hunt, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Kato, M. Kautz, R. F. Keeling, K. K. Goldewijk, A. Körtzinger, P. Landschützer, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, I. Lima, D. Lombardozi, N. Metzl, F. Millero, P. M. S. Monteiro, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S. Nakaoka, Y. Nojiri, X. A. Padin, A. Peregon, B. Pfeil, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, J. Reimer, C. Rödenbeck, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, B. D. Stocker, H. Tian, B. Tilbrook, F. N. Tubiello, I. T. van der Laan-Luijkx, G. R. van der Werf, S. van Heuven, N. Viovy, N. Vuichard, A. P. Walker, A. J. Watson, A. J. Wiltshire, S. Zaehle, and D. Zhu, 2018: Global carbon budget 2017, *Earth System Science Data*, 10, 405-448.
- Lee, S. J., J. S. Yim, Y. M. Son, Y. Son, and R. Kim, 2018: Estimation of forest carbon stocks for national

- greenhouse gas inventory reporting in South Korea, *Forests* 9, 625
- Li, M., C. Peng, M. Wang, W. Xue, K. Zhang, K. Wang, G. Shi, and Q. Zhu, 2017: The carbon flux of global rivers: A re-evaluation of amount and spatial patterns, *Ecological Indicators*, 80, 40-51.
- Lim, S., M. Lee, C. I. Czimczik, T. Joo, S. Holden, G. Mouteva, G. M. Santos, X. Xu, J. Walker, S. Kim, H. S. Kim, S. Kim, and S. Lee, 2019: Source signatures from combined isotopic analyses of PM_{2.5} carbonaceous and nitrogen aerosols at the peri-urban Taehwa Research Forest, South Korea in summer and fall, *Science of the Total Environment*, 665(10), 1505-1514.
- Maavara, T., R. Lauerwald, P. Regnier, and P. Van Cappellen, 2017: Global perturbation of organic carbon cycling by river damming, *Nature Communications*, 8, 15347.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirotani, N. Kondo, K. Goto, K. Ishikawa, T. Nakazawa, and T. Ogawa, 2008: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technologies*, 25, 1744-1754.
- Matsueda, H., T. Machida, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirotani, H. Ikeda, N. Kondo, and K. Goto, 2008: Evaluation of atmospheric CO₂ measurements from new flask sampling of JAL airliner observations. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 59, 1-17.
- McGuire, A. D., J. M. Melillo, D. W. Kicklighter, Y. Pan, X. Xiao, J. Helfrich, B. Moore, C. J. Vorosmarty, and A. L. Schloss, 1997: Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: Sensitivity to changes in vegetation nitrogen concentration, *Global Biogeochemical Cycles*, 11, 173-189.
- Park, J.-H., O. K. Nayna, M. S. Begum, E. Chea, J. Hartmann, R. G. Keil, S. Kumar, X. Lu, L. Ran, J. E. Richey, V. V. S. Sarma, S. M. Tareq, D. T. Xuan, and R. Yu, 2018: Reviews and syntheses: Anthropogenic perturbations to carbon fluxes in Asian river systems - Concepts, emerging trends, and research challenges, *Biogeosciences*, 15, 3049-3069.
- Peters, W., A. R. Jacobson, C. Sweeney, A. E. Andrews, T. J. Conway, K. Masarie, J. B. Miller, L. M. P. Bruhwiler, G. Pétron, A. I. Hirsch, D. E. J. Worthy, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, P. O. Wennberg, M. C. Krol, and P. P. Tans, 2007: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proceedings of the National Academy of Science. U.S.A.*, 104, 18925-18930.
- Peters, W., M. C. Krol, G. R. van der Werf, S. Houweling, C. D. Jones, J. Hughes, K. Schaefer, K. A. Masarie, A. R. Jacobson, J. B. Miller, C. H. Cho, M. Ramonet, M. Schmidt, L. Ciattaglia, F. Apadula, D. Heltai, F. Meinhardt, A. G. di Sarra, S. Piacentino, D. Sferlazzo, T. Aalto, J. Hatakka, J. Strom, L. Haszpra, H. A. J. Meijer, S. van der Laan, R. E. M. Neubert, A. Jordan, X. Rodo, J.-A. Morgui, A. T. Vermeulen, E. Popa, K. Rozanski, M. Zimnoch, A. C. Manning, M. Leuenberger, C. Uglietti, A. J. Dolman, P. Ciais, M. Heimann, and P. Tans, 2010: Seven years of recent European net terrestrial carbon dioxide exchange constrained by atmospheric observations. *Global Change Biology*, 16, 1317-1337.
- Ryu, Y., J. A. Berry, and D. D. Baldocchi, 2019: What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities, *Remote Sensing of Environment*, 223, 95-114.
- Raymond, P. A., J. Hartmann, R. Lauerwald, S. Sobek, C. McDonald, M. Hoover, D. Butman, R. Striegl, E. Mayorga, C. Humborg, P. Kortelainen, H. Duerr, M. Meybeck, P. Ciais, and P. Guth, 2013: Global carbon dioxide emissions from inland waters, *Nature*, 503, 355-359.
- Regnier, P., P. Friedlingstein, P. Ciais, F.T. Mackenzie, N. Gruber, I.A. Janssens, G.G. Laruelle, R. Lauerwald, S. Luyssaert, A.J. Andersson, S. Arndt, C. Arnosti, A.V. Borges, A.W. Dale, A. Gallego-Sala, Y. Godderis, N. Goossens, J. Hartmann, C. Heinze, T. Ilyina, F. Joos, D.E.

- LaRowe, J. Leifeld, F.J.R. Meysman, G. Munhoven, P.A. Raymond, R. Spahni, P. Suntharalingam, and M. Thullner, 2013: Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean, *Nature Geoscience*, 6, 597-607.
- Rhee, H., J.-A., Kim, J. Gil, M. Lee, et al., 2019: Peroxyacetyl nitrate in relation to Ozone at upwind (Bangnyeong) and downwind (Taehwa) sites of Seoul during the KORUS-AQ, *Elementa*, Submitted.
- Ro, H. M., Y. Ji, and B. Y. Lee, 2018: Interactive effect of soil moisture and temperature regimes on the dynamics of soil organic carbon decomposition in a subarctic tundra soil, *Geosciences Journal*, 22, 121-130.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin III, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. A. Foley, 2009: A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 471-475.
- Ryu, J. S., K. S. Lee, H. W. Chang, and H. S. Shin, 2008: Chemical weathering of carbonates and silicates in the Han River basin, South Korea, *Chemical Geology*, 247, 66-80.
- Ryu, Y., D. D. Baldocchi, H. Kobayashi, C. Van Ingen, J. Li, T. A. Black, J. Beringer, E. Van Gorsel, A. Knohl, B. E. Law, and O. Roupsard, 2011: Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1-km to global scales, *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB4017.
- Schuur, E. A. G., J. Bockheim, J. G. Canadell, E. Euskirchen, C. B. Field, S. V. Goryachkin, S. Hagemann, P. Kuhry, P. M. Lafleur, and H. Lee, 2008: Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle, *BioScience*, 58, 701-714.
- Schuur, E. A. G. and M. C. Mack, 2018: Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49, 279-301.
- Shin, W. J., G. S. Chung, D. Lee, and K. S. Lee, 2011: Dissolved inorganic carbon export from carbonate and silicate catchments estimated from carbonate chemistry and $\delta^{13}\text{CDIC}$, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2551-2560.
- Shin, Y., E. -J. Lee, Y. -J. Jeon, J. Hur, and N. -H. Oh, 2016: Hydrological changes of DOM composition and biodegradability of rivers in temperate monsoon climates, *Journal of Hydrology*, 540, 538-548.
- Shin, W. J., K. S. Lee, Y. Park, D. Lee, and E. J. Yu., 2015: Tracing anthropogenic DIC in urban streams based on isotopic and geochemical tracers, *Environmental Earth Sciences*, 74, 2707-2717.
- Tripathi, B. M., H. M. Kim, J. Y. Jung, S. Nam, H. T. Ju, M. Kim, and Y. K. Lee, 2019: Distinct taxonomic and functional profiles of the microbiome associated with different soil horizons of a moist tussock tundra in Alaska. *Frontiers in Microbiology*, 10.
- Turner P. A., T. J. Griffis, X. Lee, J. M. Baker, R. T. Venterea and J. D. Wood, 2015: Indirect nitrous oxide emissions from streams within the US Corn Belt scale with stream order. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 9839-9843.
- Vicente-Vicente, J. L., S. Fuss, C. Song, J. Lee, M. Kim, W. K. Lee, and Y. Son, 2019: A Holistic View of Soils in Delivering Ecosystem Services in Forests: A Case Study in South Korea. *Forests*, 10(6), 487.
- Virtanen, R., L. Oksanen, T. Oksanen, J. Cohen, B. C. Forbes, B. Johansen, J. Kayhko, J. Olofsson, J. Pulliainen, and H. Tommervik, 2016: Where do the treeless tundra areas of northern highlands fit in the global biome system: toward an ecologically natural subdivision of the tundra biome, *Ecology and Evolution*, 6, 143-158.
- Walker, D. A., M. K. Raynolds, F. J. A. Daniels, E. Einarsson,

- A. Elvebakk, W. A. Gould, A. E. Katenin, S. S. Kholod, C. J. Markon, E. S. Melnikov, N. G. Moskalenko, S. S. Talbot, B. A. Yurtsev, and The other members of the CAVM Team, 2005: The Circumpolar Arctic Vegetation Map, *Journal of Vegetation Science*, 16, 267-282.
- Ward, N. D., T. S. Bianchi, P. M. Medeiros, M. Seidel, J. E. Richey, R. G. Keil, and H. O. Sawakuchi, 2017: Where carbon goes when water flows: Carbon cycling across the aquatic continuum, *Frontiers in Marine Science*, 4, 7.
- Went, F. W. 1960: Blue hazes in the atmosphere, *Nature*, 187, 641-643.
- Yang, H., D. Jeong, M. Kang, J. Chun, J. H. Lim, and J. Kim. 2019: Interannual variability of gross primary production in Gwangneung deciduous forest: Revisiting thermodynamic paradigm. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* (in preparation).
- Yang, K., Y. Ryu, B. Dechant, J. A. Berry, Y. Hwang, C. Jiang, M. Kang, J. Kim, H. Kim, A. Kornfeld, and X. Yang. 2018: Sun-induced chlorophyll fluorescence is more strongly related to absorbed light than to photosynthesis at half-hourly resolution in a rice paddy, *Remote Sensing of Environment*, 216, 658-673.
- Yoo, S., D. A. Kwak, G. Cui, W. K. Lee, H. Kwak, A. Ito, Y. Son, and S. Jeon, 2013: Estimation of the ecosystem carbon budget in South Korea between 1999 and 2008, *Ecological Research*, 28, 1045-1059.
- Yoon, T. K., H. Jin, M. S. Begum, N. Kang, and J. -H. Park, 2017: CO₂ outgassing from an urbanized river system fueled by wastewater treatment plant effluents, *Environmental Sciences and Technology*, 51, 10459-10467.
- Yoon, T. K., N. J. Noh, H. Chung, A. R. Yang, and Y. Son, 2015: Soil nitrogen transformations and availability in upland pine and bottomland alder forests. *Forests*, 6(9), 2941-2958.
- Zhang, T., J. A. Heginbottom, R. G. Barry, and J. Brown, 2000: Further statistics on the distribution of permafrost and ground ice in the Northern Hemisphere, *Polar Geography*, 24, 126-31.

참여 연구진

제 1 장 소개

주 저 자	김 선 태	(APEC 기후센터)
기여저자	명 복 순	(APEC 기후센터)
	전 종 안	(APEC 기후센터)
	김 대 하	(APEC 기후센터)
	이 우 섭	(APEC 기후센터)
감수저자	문 자 연	(건국대학교)

제 4 장 고기후기록에 의한 정보

주 저 자	공 우 석	(경희대학교)
기여저자	조 태 섭	(연세대학교)
	이 상 현	(한국지질자원연구원)
	서 정 욱	(충북대학교)
	김 다 빈	(네이처그래피)
감수저자	김 성 중	(극지연구소)

제 2 장 관측: 대기과 지표

주 저 자	예 상 욱	(한양대학교)
기여저자	함 유 근	(전남대학교)
	유 창 현	(이화여자대학교)
	정 재 인	(서울대학교)
	성 미 경	(연세대학교)
	우 성 호	(전남대학교)
감수저자	김 동 준	(기상청)

제 5 장 탄소순환과 기타 생지화학순환

주 저 자	김 준	(서울대학교)
기여저자	강 민 석	(국가농림기상센터)
	김 득 수	(군산대학교)
	김 현 미	(연세대학교)
	김 현 석	(서울대학교)
	류 영 렬	(서울대학교)
	박 지 형	(이화여자대학교)
	이 미 혜	(고려대학교)
	최 태 진	(극지연구소)
감수저자	손 요 환	(고려대학교)

제 3 장 관측: 해양 및 빙권

주 저 자	이 재 학	(한국해양과학기술원)
	김 성 중	(극지연구소)
기여저자	남 성 현	(서울대학교)
	박 경 수	(안양대학교)
	박 근 하	(한국해양과학기술원)
	한 인 성	(국립수산과학원)
	박 상 종	(극지연구소)
	이 원 상	(극지연구소)
	김 주 홍	(극지연구소)
	전 상 윤	(극지연구소)
감수저자	김 철 호	(한국해양과학기술원)
	김 백 민	(부경대학교)

제 6 장 구름과 에어로졸

주 저 자	염 성 수	(연세대학교)
기여저자	김 병 곤	(강릉원주대학교)
	엄 준 식	(부산대학교)
	구 자 호	(연세대학교)
	최 명 제	(NASA)
감수저자	윤 순 창	(서울대학교)