

기후위기 대응을 위한 국가 생태계 표준관측망의 필요성 및 구축 방안*

The Necessity and Construction Plan of a National Standard Ecosystem Observation Network in Response to the Climate Crisis

안지애** · 주성배*** · 박정수**** · 이호혜미***** · 박은진*****

Jiae An · Sungbae Joo · Jeong-Soo Park · Hyohyemi Lee · Eun-Jin Park

요약: 최근 들어 기후변화에 의한 생태계 변화 관측·모니터링을 통한 데이터 기반의 기후위기 대응이 점차 중요해지고 있다. 국내에서는 국가장기생태연구 등 생태계 변화 관측 연구가 일부 수행되기는 했으나 국외 선진사례와 비교하여 규모와 수준이 매우 미흡하다. 따라서 국내에서도 선진사례를 벤치마킹하여 생태계 표준관측망을 구축하고 표준화된 방법을 통해 종합적인 장기 관측을 수행함으로써 데이터를 축적해 나가야 할 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 국가 생태계 표준관측망의 개념과 기능을 정립하고 국내 상황에 맞는 구축 방안을 구체적으로 제시하였다. 국외 사례 조사를 통한 국내 적용 시사점과 국내 여건을 고려할 때 관측지지는 5개소 내외가 적당할 것으로 판단된다. 또한 표준관측망은 종합생태관측기지, 일반생태관측소, 이동식생태관측플랫폼 등 세 개 관측소 유형으로 구성하고 유형별로 적절한 관측항목을 선정해야 한다. 마지막으로 자체 데이터 포털 구축을 통해 기존의 생태조사 연구 및 통합정보관리시스템과 연계하고 데이터의 활용성을 제고하여 정책 근거 및 국제 대응 자료로 활용해야 할 것으로 생각된다.

핵심주제어: 기후변화, 생태계, 모니터링, 관측망

Abstract: Recently, monitoring ecosystem changes due to climate change and responding with data-driven strategies are increasingly important. Although Korea has conducted some ecosystem change studies, such as national long-term ecological research, the scale remains limited compared to advanced international efforts. With this in mind, building research infrastructure by benchmarking advanced cases and conducting standardized, comprehensive long-term observations is essential. Therefore, this study established the concept and function of the national ecosystem observation network, and presented a construction plan. Considering the application implications through overseas case studies and domestic conditions, five observation sites would be appropriate. A Korean ecosystem observation network tailored to domestic conditions should be established, comprising comprehensive, general, and mobile ecological observation stations. Lastly, linking this data with existing ecological research and integrated information systems with an own data portal will enhance data utilization, supporting policy development and international cooperation on climate issues.

Key Words: Climate Change, Ecosystem, Monitoring, Observation Network

* 본 논문은 2024년도 환경부 고유사업(2024년 국가장기생태연구)의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

** 주저자, 국립생태원 기후생태연구실 기후생태관측팀 전임연구원

*** 공동저자, 국립생태원 기후생태연구실 기후생태관측팀 전임연구원

**** 공동저자, 국립생태원 기후생태연구실 기후생태관측팀 선임연구원

***** 공동저자, 국립생태원 기후생태연구실 기후생태관측팀 팀장

***** 교신저자, 국립생태원 기후생태연구실 실장

I. 서론

세계경제포럼은 생물다양성 손실과 생태계의 붕괴가 향후 10년 이내에 가장 빠르게 악화되는 글로벌 리스크가 될 것으로 예측했다(WEF, 2023). 생물다양성 손실과 기후변화의 상호 연계된 위기가 사회경제 시스템에 미치는 영향을 극복하기 위해 이들 간의 연관성을 파악하는 것은 중요하다(Pörtner et al., 2023). 기후위기 대응을 위해서뿐만 아니라 2022년 12월 새로 발표된 쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크의 이행이나 기업의 자연 관련 재무정보 공개(TNFD)¹⁾ 대응을 위해서도 과학적 데이터와 연구를 기반으로 기후변화에 의한 생태계 변화와 구체적인 영향 요인을 파악할 필요가 있다.

생태계 변화 관찰 및 생태과정에 관한 장기적 연구는 장기생태연구(Long-Term Ecological Research, LTER)에서 시작되었다. 1980년에 시작되어 현재 27개의 사이트가 운영되고 있는 미국 장기생태연구가 대표적인데 처음부터 특정 목적을 위해 연구 주제나 사이트가 설계된 것은 아니고, 생태계 유형별로 각 사이트의 과학자들이 미국과학재단으로부터 재정적 지원을 받아 연구를 수행하고 점차 네트워크를 형성해나가는 상향식(bottom-up) 시스템으로 운영되어왔다. 그러나 각 생태계 유형별로 생태계 과정과 기능에 대한 장기연구가 심도 있게 수행되어 온 만큼 이제는 축적된 데이터를 바탕으로 기후변화가 생태계의 반응과 생태계서비스에 미치는 영향을 해석하는 데에도 크게 기여하고 있다(Jones and Driscoll, 2022).

같은 장소에서 같은 방법으로 생물·환경을 체계적이고 반복적으로 장기간 측정하여 획득한 데이터는 기후변화, 침입종, 도시화, 홍수 및 가뭄과 같은 극단적 현상으로 인한 생태계 변화를 이해하는데 매우 중요하다(Herrick, 2019). 특히 기후변화는 다양한 물리적 요인이 시간에 따라 변화하면서 생물학적 과정에도 광범위한 규모로 시공간적 영향을 미치기 때문에 그 영향을 파악하기는 매우 어렵다(Jackson, 2023). 이러한 측면에서 전 세계 여러 국가가 연구 인프라 구축을 통해 표준화된 방법으로 생물·환경 데이터를 수집·분석

1) Task Force on Nature-related Financial Disclosure.

하고 있는 추세이다. 일례로 미국의 국가생태관측망(National Ecological Observation Network, NEON)은 개념 정립부터 실제 사이트 구축까지 20년에 걸쳐 하향식(top-down) 접근으로 분명한 목적성을 가지고 체계적으로 설계되었으며, 총 81개 사이트가 동일한 프로토콜에 따라 표준화된 데이터를 생산한다는 점에서 기후변화에 따른 생태계의 반응을 분석하고 해석하는 데 매우 유용하다. 미국 LTER과 NEON은 운영체계가 상향식과 하향식이라는 점에서는 대비되지만 많은 수의 사이트를 공유하면서 상보적인 관계를 유지하고 있다.

국내에서는 생태계의 변화를 장기적으로 관찰하고 기후변화의 영향 및 그 과정을 연구하기 위해 제대로 시설을 갖춘 '생태계 변화 종합관측시스템'이 부재한 실정이다. Jackson(2023)은 기후변화 영향 분석을 목적으로 수집되지 않은 데이터를 이용해 기후변화에 대한 생태계 변화를 예측해야 하는 경우 데이터의 불안전성, 오류, 편향, 손실 등의 문제가 생길 수 있다고 보고하였으며, 따라서 실제 필요성을 바탕으로 연구 항목을 설정하여 장기생태 반응을 관측할 필요가 있다고 주장하였다. 우리나라의 경우 국가적으로 실시하는 많은 생태조사가 자연생태계의 시간적 변동과 생태과정을 모니터링하기보다는 공간적 분포 상태를 조사하여 우수 생태계 지역과 희귀 또는 멸종위기 생물종의 서식을 확인하고 평가하는 데에 초점을 맞추어왔다고 볼 수 있다. 그 간 국가장기생태연구 등을 통해 시간적인 변동과 과정에 대한 조사가 지속되기는 했으나, 국외 사례들과 비교해볼 때 규모나 방법론 측면에서 한계를 가지는 것으로 보인다. 따라서 국내에도 기후변화 영향 평가라는 목적성을 갖는 고정적인 연구 인프라를 구축할 필요가 있다.

생태계 과정과 기능의 복잡성과 변동성을 구명할 수 있는 우리나라 생태계 표준관측망의 효율적인 구축을 위해서는 먼저 국내 현황을 진단하고 국외 사례를 분석하여 국내 실정에 맞는 구축 계획을 수립하여야 한다. 그러나 지금까지 국내 부문별 생태계 조사·관측 현황을 종합적으로 정리하거나 표준관측망의 개념을 정립한 사례는 없다. 따라서 본 논문에서는 국내 생태계 조사·관측 현황을 진단하고 이를 보완하기 위한 사이트와 인프라로서의 생태

계 표준관측망의 개념과 기능을 명확히 하고자 한다. 또한 국외 우수사례 분석을 통해 국내 상황에 맞는 국가 생태계 표준관측망의 구축 방안을 구체적으로 제시하고자 한다.

II. 국내 생태계 관측 현황 진단

1. 국내 생태계 관측 및 관측망 운영 현황

국내에서 부문별 생태계 관측 현황을 종합적으로 정리한 선행연구는 없으며 CO₂ 플럭스 분석 결과에 관한 연구 논문이 주를 이루고 있다(Chen·Zhao·Cui·Lee, 2024; Hur·Shim·Lee·Kim·Jo, 2020; Yang et al., 2021). 본 장에서는 국내에서 오랫동안 국가 규모의 생태조사를 수행해온 국가장기생태 연구와 여러 기관에서 타워 기반의 관측을 수행하고 있는 CO₂ 플럭스, 고정 지점을 기준으로 표준 데이터를 생산하고 있는 기상·환경관측망의 운영 사례를 정리하고 개선사항을 제시하였다.

1) 국가장기생태연구 사이트

국내에는 고정된 지점에서 연구 장비와 시설을 갖추고 장기적으로 생태계의 반응과 변화를 관찰할 수 있으며 다른 지점과 비교분석 가능한 데이터를 생산할 수 있는 생태계 관측망은 엄밀하게 볼 때 없다고 할 수 있다. 장기적인 변화관찰 연구라는 측면에서 국가장기생태연구가 가장 유사한 접근이라고 볼 수 있으나 점봉산 사이트를 제외하고 대부분의 사이트 규모는 고정조사구 정도에 지나지 않으며, 따라서 사이트 간 비교가 어렵다.

한국환경산업기술원과 국립환경과학원 주관으로 제1차 국가장기생태연구(2004~2013년)가 수행되었고, 제2차 국가장기생태연구(2014~2025년)가 국립생태원 주관으로 진행 중이다. 국가장기생태연구는 한반도 대표 생태계 유형을 대상으로 다양한 연구 분야의 동시 연구를 실시함으로써 복합적 장기

생태연구 결과를 도출하여 생태계 변화에 대한 국가적 대응을 지원하고자 하는 목적을 가지고 시작되었다. 아직까지 장기 데이터가 충분히 축적되지 않았다는 문제도 있으나, 1차 연구의 경우 현장 생태조사 위주의 연구가 수행되어 연구지소 및 연구방법의 연계성이 미흡하다는 점과 개별 연구자 중심의 연구로 표준 데이터 생산 및 데이터의 활용성이 낮다는 한계를 가졌다. 2차 연구는 아직 진행 중이나 예산 부족으로 인해 CO₂ 플렉스를 비롯해 관측 인프라가 부족하다는 점과 전 국토에 대한 기후변화의 영향 분석 및 정책 활용이 미흡한 것으로 판단되어 개선이 필요한 것으로 보인다.

특히 초창기에는 자동기상관측장비(AWS)와 같은 기본 관측장비도 갖추지 못한 사이트가 대부분이었다. 따라서 연구자들이 각자의 연구 주제를 가지고 반복적 모니터링을 수행하는 고정조사구의 개념에 더 가까웠으며 연구자들 간의 협력체제와 연계성을 가진 종합적 연구가 실제로 진행되는 못하였다. 또한 일부 1차 장기생태연구사이트는 연구가 지속적으로 이어지지 못하고 운영이 중단되기도 하였다(표 1). 2차 국가장기생태연구를 진행하면서 일부 사이트에 CO₂ 플렉스타워를 설치하는 등 자동 관측시설을 부분적으로 보강하고 데이터를 체계적으로 관리하기 시작하였다. 그러나 현재로서는 탄소순환, 식물계절, 식생동태, 곤충동태 등 부문별 연구가 한 장소에서 종합적으로 수행되는 곳은 점봉산 사이트가 유일하다. 즉, 부문 간 상호작용을 파악하는 등의 연계 연구는 아직 없고 장기 모니터링 데이터의 유의미한 분석 결과를 얻기에는 연구 기간이 길지 않다.

〈표 1〉 국가장기생태연구 사이트 및 관측항목('24.8. 기준)

지소명 (구분)	연구기간	운영여부 (‘24.8.기준)	주요관측 항목	지소명 (구분)	연구기간	운영여부 (‘24.8.기준)	주요관측 항목
순천만 (1차)	‘10~‘13	×	pH, 기온, 강수	남산 (1, 2차)	‘04~‘13 ‘16~진행 중	○	생물량, 미기상
한강 (1차)	‘05~‘13	×	수온, DO, 개체수	지리산 (1, 2차)	‘05~‘13 ‘16~진행 중	○	생물량, 미기상
낙동강 (1차)	‘04~‘13	×	수온, DO, 개체수	한라산 (1, 2차)	‘09~‘13 ‘16~진행 중	○	생물계절, 미기상
새만금 (1차)	‘07~‘13	×	수온, DO, 개체수	함평만 (1, 2차)	‘04~‘13, ‘16~진행 중	○	pH, 수분함량

대청호 (1차)	'08~'13	×	수온, DO, 개체수	고래불 (1, 2차)	'08~'13, '22~진행 중	○	pH, 미기상
월악산 (1차)	'04~'13	×	생물량, 유기탄소량	우포 (1, 2차)	'05~'13 '23~진행 중	○	생물계절, 미기상
울릉도 (1차)	'10~'13	×	생물량, 유기탄소량	소양호 (2차)	'16~진행 중	○	수온, DO, 개체수
산불지 (1차)	'03~'13	×	생물량, 낙엽생산량	서천 (2차)	'17~진행 중	○	생물량, CO ₂ 플럭스
여천공업단지(1차)	'08~'13	×	생물량, 낙엽생산량	완도 (2차)	'17~진행 중	○	생물계절
묵논 (1차)	'10~'13	×	출현종, 피도	영양 (2차)	'23~진행 중	○	생물계절, 미기상
점봉산 (1, 2차)	'04~'13 '15~진행 중	○	생물량, CO ₂ 플럭스	장항습지 (2차)	'23~진행 중	○	생물계절

2) 생태계 탄소 수지 관측 플렉스타워

생태계 내의 탄소 저장과 이동 등 탄소순환을 측정하여 생태계의 온실가스 흡수 기능을 평가하고 변동을 분석하는 것은 기후변화 대응에 있어 중요하다. 생태계 내 탄소 수지 분석 방법론 중 에디 공분산 기법은 산림, 농경지, 초지, 습지 등 다양한 육상생태계를 대상으로 생태계와 대기 간 탄소순환을 높은 정확도로 측정할 수 있어 널리 이용되고 있다(이보라·강완모·김충기·김지은·이창훈, 2017). 에디 공분산을 통해 순 생태계 교환량, 총일차생산량, 증발산량, 순 생태계 이산화탄소 교환량 등을 관측할 수 있으며 이러한 결과는 탄소중립 실현을 위한 정책적 근거로 활용될 수 있어 환경부를 비롯해 농촌진흥청, 산림청 등 여러 부처에서 플럭스 타워를 이용해 CO₂ 플럭스를 측정하고 있다.

현재 전국 26개소에 플렉스타워가 설치되어 운영 중인 것으로 파악되는데 국립생태원, 국립농업과학원, 국립산림과학원, 국립환경과학원 및 국가농림기상센터에서 산림과 농경지의 탄소 플럭스를 관측하고 있다. 또한 환경부와 한국수자원공사에서는 12개 수계 증발산량관측소를 운영하고 있다(안상익·이승민·이효상·천효권, 2023)(표 2). 플럭스 타워는 기후변화 대응 목적의 생태계 관측망에서 필수 시설이라고 할 수 있는데 현재는 우리나라 서

울·경기, 강원권에 주로 분포하는 것으로 확인된다.

〈표 2〉 국내 생태계 탄소 수지 관측 플렉스타워 현황

운영 기관	설치 위치	플렉스타워 분포
국립생태원	인제(점봉산), 서천	
국립농업과학원	김제, 의성	
국립산림과학원	광릉, 인연도, 완도, 제주도, 홍천(매화산), 평창(가리왕산), 삼척(검봉산)	
국립환경과학원	대화산	
국가농림기상센터	해남, 철원	
환경부, 한국수자원공사	평창, 여주(청미천), 인제, 홍천, 파주(설마천), 무주, 진안, 영동, 공주, 장흥, 무안, 고창	

3) 기상 및 환경 관측망

국내에서 관측망 기반의 생물·생태 요소에 대한 관측은 부족하지만, 기상과 대기, 수질 등 환경요인에 대한 관측망은 상대적으로 잘 구축되어 운영 중이다. 크게 기상, 대기, 해양·수계 등의 분야에 대해 고정 지점(관측소)을 기반으로 표준 데이터가 수집되고 있다(표 3). 자동관측장비 활용의 특성상 기상자료에 대한 관측망이 가장 활발하게 운영되고 있으며 일반 기상뿐만 아니라 농업, 산악, 해양, 낙뢰, 지진 등 부처별로 특정 목적성을 갖는 기상관측망도 구축되어있다.

대기의 경우 기상청과 환경부 주관으로 관측망이 운영되고 있으며 질적인 측면에서 미세먼지와 유해대기오염물질 등의 측정에 초점을 맞추고 있는 것으로 나타났다(한국환경공단, 2024). 해양·수계는 해양수산부와 환경부에서 주관하는 4개의 관측망이 운영 중이다. 해양수산부에서 관할하는 3개 관측망은 이화학적 특성을 포함한 환경적 요인이 주요 관측 대상이다. 환경부 물환경측정망의 경우 측정망의 종류를 수질, 총량, 자동, 퇴적물, 방사성물질, 비점오염물질 등으로 세분화하여 운영하고 있으며 특기할만한 점은

3,856개 생물측정망을 가지고 있다는 점이다(환경부, 2024). 생물측정망은 하천, 보, 하구, 호소로 구간을 나누어 구간별로 수생식물(생물적 요인)과 하천환경(환경적 요인)을 종합 측정하며 표준화된 관측 방법을 갖는다(환경부, 2024).

〈표 3〉 국내 기상 및 환경 관측망 현황('24.8. 기준)

분야	운영 기관	관측망 이름	관측 정보
기상	기상청	종관기상 관측망	-98개소 -지방청, 지청, 기상대, 관측소 등에 설치되어 기상현상 관측 및 국제전문을 통한 자료 공유 등의 관측업무 -방재기상관측요소 + 일조, 일사, 초상온도, 지면온도, 지중온도 등
		방재기상 관측망	-541개소 -산악지역이나 섬처럼 사람이 관측하기 어려운 곳에 설치하여 집중호우, 우박, 뇌우, 돌풍 등과 같은 국지적인 위험 기상 현상을 실시간으로 감시 -기온, 풍향, 풍속, 강수량, 강수유무, 기압, 습도
		기후변화 감시소	-기본감시소 4개소(안면도, 제주 고산, 울릉도·독도, 포항), 위탁관측소 7개소(대학 및 남극과학기지) -온실가스, 반응가스, 에어로졸, 성층권오존, 자외선, 대기복사, 총대기침적 등
		해양기상 관측	-해양기상부이 31개소, 파고부이 73개소, 선박기상관측장비 22개소, 연안기상관측장비 18개소, 해양안개관측장비 100개소, 해양기상관측선 1척
		기타 기상관측	-기상레이더 10개소, 낙뢰관측장비 21개소, 항공기상관측장비 8개소, 지진관측장비 265개소
	국립농업과학원	농업기상 관측망	-211개소 -기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량, 일사량, 일조시간, 토양수분 등
	국립산림과학원	산악기상 관측망	-480개소 -강수량, 습도, 풍속 등
	국립공원공단	국립공원산악 기상관측	-151개소(AWS + 강수량계), -기온, 습도, 바람, 강수량 등
대기	기상청	황사관측	-36개소, 평균 미세먼지 농도
	한국환경공단	대기환경 측정망	-651개소 -SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃ , PM-10, PM-2.5, VOCs, 기타 기상 항목 등
해양, 수계	국립해양조사원	국가해양 관측망	-조위관측소 50개소, 해양관측소 3개소, 해양관측부이 38개소, 해양유동관측소 9개소, 해양관측기지 3개소 -조위, 파고, 유향, 유속, 수온, 염분, 기온, 기압, 풍향, 풍속 등
	해양환경공단	해양환경 측정망	-425개 정점 -투명도, 수온, 염분, 용존산소량, 질소, 인, 부유물질 등

	해양수질 자동측정망	-19기 -전기전도도, 수온, pH, 용존산소, 탁도, 염분, 클로로필 등
국립환경과학원, 환경청, 물환경연구소, 한국수자원공사, 한국환경공단, 홍수통제소	물환경 측정망	-일반측정망 2,323개소, 생물측정망 3,856개소 -수질측정망(수온, pH, BOD, 총질소, 총인, 총대장균군수 등) -총량측정망(수온, pH, BOD, COD, TOC, 전기전도도 등) -자동측정망(수온, pH, DO, 전기전도도, TOC, VOCs, 페놀 등) -퇴적물측정망(수심, 수온, 퇴적물 입도, 평균입경, 함수율 등) -방사성물질측정망(134Cs, 137Cs, 131I) -생물측정망(어류 등의 수생식물, 수변식생, 서식 및 수변환경) -비점오염물질측정망(수온, pH, DO, 전기전도도, 탁도, 총질소, 총인 등)

2. 진단 및 개선점

국내 생태계 관측 현황의 진단사항과 그에 따른 개선점은 크게 네 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 국내에서는 관측망을 활용해 생물적 요인과 환경적 요인을 종합적으로 측정하는 사례가 거의 없다. 기상관측망과 여러 환경적 요인을 측정하기 위한 관측소가 다수 있으며, 생물분류군 또는 생태계 유형에 따라 생물 분포·동태 등이 조사된 바 있으나 고정된 지점에서 이들을 동시에 관측하고 상관관계를 분석한 사례는 찾기 어렵다. 따라서 생태계 유형별로 적지를 선정하여 기상·기후변수와 생물변수를 동시에 관측하는 종합 관측 인프라를 구축할 필요가 있다.

둘째, 생태계의 탄소 수지를 측정하는 CO2 플럭스타워의 경우 비교적 개소 수는 충분하지만, 운영하는 기관들이 다양하고 일부는 타워 설치만 되어 있을 뿐 측정장치가 제대로 가동되지 않고 있으며 지역적으로 위치가 편중되어 있다. 주로 서울·경기권과 강원권에 집중되어 있어 중부와 남동쪽 지역에 측정이 추가되어야 하며, 운영 기관 간에 자료 공유가 필요하다.

셋째, 기존의 생태조사의 경우 조사 주기가 길거나 일회성으로 수행되어 연속적 자료를 획득하고 환경변화에 대한 시계열적 영향을 분석하기가 어려웠다. 따라서 앞으로는 표준화된 방법으로 연속성 있는 장기생태 데이터를 생산할 수 있는 관측 체계를 구축해야 한다.

마지막으로 국내 우수 생태계 발굴, 희귀 또는 멸종위기 생물종의 서식지 조사, 외래생물의 분포 조사 등 공간적으로 상태를 평가하기 위한 조사들은

많이 이루어지고 있으나, 생태계가 시간적으로 어떻게 변동하는지와 그 원인을 분석하기 위한 집중적이고 종합적인 관측은 미흡하다. 따라서 관측 대상, 범위를 설정함에 있어 단순히 공간적 측면에서 생물종 분포를 확인하거나 관측 범위를 넓히기만 하는 것이 아니라 집중관측 연구지에서 환경적 요인의 시계열적 변화와 생물의 생리·생태적 변화, 그리고 둘 사이의 상호작용 및 영향을 평가할 수 있는 방식으로 관측이 이루어져야 할 것이다.

Ⅲ. 주요 선진사례 분석 및 국내 적용 시사점

본 장에서는 국가 규모에서 생태계 관측망을 운영하고 사례에 대해 운영 현황을 개관하고, 그 중 데이터 수집부터 분석·공개까지 체계적 운영이 이루어지고 있는 미국의 NEON과 호주의 육상생태계 연구 네트워크(Terrestrial Ecosystem Research Network, TERN)을 집중적으로 고찰하고자 한다. 또한 글로벌 생태계 연구 인프라 네트워크(Global Ecosystem Research Infrastructure, GERI)에 대해 살펴보고 국내 적용 시사점을 도출하고자 한다.

1. 국외 주요 국가들의 생태계 관측망 현황

전 세계적으로 주요 선진국에서는 1990년대 이후 각 국가의 생태계 변동 특성을 이해하고 생태계 변화를 관측하기 위한 연구 인프라를 구축하여 운영하고 있다. 국토 전역에 대해 관측소를 설치하여 운영하는 국가들의 관측망 운영 현황을 <표 4>와 같이 정리하였다. 중국과 영국은 1990년대, 호주와 남아프리카공화국은 2000년대, 미국은 2010년대부터 각각의 관측망을 구축하여 운영하고 있다.

미국은 대륙을 20개의 생태기후권역(ecoclimatic domain)으로 구분하고 권역마다 관측소를 두어 전 국토의 생태 및 기후 다양성을 파악할 수 있도록 하였으며 각각의 권역에서 식물, 동물, 토양, 양분, 수계, 대기 정보를 수집한다. 관측소는 전체 81개소로 47개의 육상생태계 관측소와 34개의 수생태계

관측소로 구성된다(NEON, 2024).

호주는 대륙의 여러 기후대를 포함하는 800개 이상의 관측소에서 대기, 생물, 수계, 토양, 식생에 관한 정보를 수집한다. 관측소는 관측 규모에 따라 경관대륙 규모, 지역 규모, 조사지 규모로 나뉘며 각각의 사이트에서 목적과 관측 방법에 따른 모니터링이 이루어진다(TERN 2024).

한편, 중국은 중국 정부와 세계은행의 지원으로 중국과학아카데미(China Academy of Sciences)에서 1950년대 중반부터 관측소를 설치해 1998년 중국 생태계 연구 네트워크(Chinese Ecosystem Research Network, CERN) 구축을 완료함으로써 가장 오래된 역사를 가진다(CERN, 2024). 관측망은 신장 위구르 자치구와 티베트 자치구에 있는 4개의 관측소를 포함해 총 44개의 관측소로 구성되어 있으며, 생물, 토양, 수문, 대기, 수생태계에 대한 5개 하위 센터와 종합연구센터가 존재한다. CERN의 하위 센터인 SCB (Sub-Center for Biology)에서는 데이터 표준화 및 품질관리를 담당하며 이렇게 취합된 데이터는 자체 포털에서 키워드(생물량, 뿌리, 미생물 등)와 생태계 유형별로 제공된다(CERN, 2024). 그러나 공개된 바로는 CERN의 공식 홈페이지와 데이터 포털의 구분이 없고 데이터 역시 샘플데이터만(.xlsx) 제공되며 시각화·지도화된 자료는 제공되지 않아 NEON, TERN의 운영 및 서비스 방식과는 차이가 있다.

영국의 경우 1992년부터 환경변화네트워크(Environmental Change Network, ECN)을 구축하여 육상생태계에 대해서는 1993년, 담수생태계에 대해서는 1994년부터 데이터를 수집해왔다. 현재 생태계 유형별(육상, 호소, 하천 등) 55개의 관측소가 운영되고 있으며 자체 포털을 통해 물리화학적 변수, 식생, 분류군 등과 관측소에 따른 데이터를 제공한다. 그러나 현재 포털에는 최대 2015년도까지의 데이터만이 공개되어있어 최신화된 자료는 확인할 수 없다(ECN, 2024).

남아프리카공화국 국가 연구재단은 2002년부터 남아프리카공화국 환경 관측망(South African Environmental Observation Network, SAEON)을 구축하고 운영해왔다. SAEON은 남아프리카공화국 전역의 특정 생태계와 환

경 조건을 대표하는 7개의 노드(node)로 구성되어 있으며 각각의 노드는 주요 연구목적과 연구 인프라, 플랫폼을 갖는다. SAEON 연구 인프라는 크게 육상(EFTEON), 해양(SMCRI), 극지(SAPRI)로 나뉘고 그 중 EFTEON은 6개 연구지로 구성된다. 각 연구지에는 과학자와 기술진으로 구성된 팀이 있어서 연구지에 대한 상세한 설명과 예산 등을 포함한 자체 제안서를 작성하고 인프라를 운영한다. SAEON 역시 자체 개방형 데이터 포털을 가지고 있으며 키워드와 시기, 데이터 제공자, 데이터 세트별로 다양한 형식의 데이터를 제공한다(SAEON, 2024).

일본의 경우 일본 전역에 걸친 생태계 관측망은 없으나 오키나와과학기술대학원연구소(OIST)에서 오키나와 환경관측망(Okinawa Environmental Observation Network, OKEON)을 운영하고 있다. OKEON은 오키나와의 육상환경을 모니터링하기 위한 관측망으로 오키나와에 24개의 사이트를 가지고 있으며 기상자료 기록, 절지동물 수집, 포유류와 조류의 분포 등을 모니터링한다. OKEON 역시 장기 시공간계열 관측을 통해 현장, 분자적 수준의 데이터, 인포매틱스를 결합하는 것을 목적으로 하는데, 특히 대학뿐만 아니라 시민 과학자와의 연계 및 네트워크를 통해 관측망을 운영하고 연구를 수행하고 있다(OKEON, 2024).

〈표 4〉 국외 생태계 관측망 운영 현황('24.8. 기준)

관측망 이름	National Ecological Observatory Network (NEON)	Terrestrial Ecosystem Research Network (TERN)	Chinese Ecosystem Research Network (CERN)	Environmental Change Network (ECN)	South African Environmental Observation Network (SAEON)					
국가	미국	호주	중국	영국	남아프리카공화국					
기후대	평원, 대서양, 신열대, 고원, 툰드라 등 포함 20개 생태기후권역	열대(북부), 아열대(동부), 사막기후(중부), 온대(남부)	열대, 아열대, 온대, 한온대	서안해양성기후	온대, 사막기후(사바나), 아열대					
규모 (개소)	81개소: 육상생태계(47), 수생태계(34)	경관대륙규모(13), 지역규모생태감시(>800), 생태과정 집중조사지(16)	44개소: 농업(15), 산림(12), 연안(3), 호소(3), 습지(2), 초원(2), 사막(6), 도시(1)	55개소: 육상(11), 호소(16), 하천(28)	15개소: 육상(6), 해양(7), 극지(2)					
측정 항목	대기	풍향, 대기온도, 알베도, 동위원소, 기압 등	대기	CO2 농도, 기압, 건조도, 폭염 빈도, 강수량 등	산림	바이오매스, 종 구성, 식물계절, 조류 등	물리정보	미기상, 하천 정보 등	대기	온도, 강수량, 풍속, 습도 등
	생물 지구화학	식생, 미생물, 물질순환, 이화학적 특성 등	생물	동물, 조류, 균류 등 분류 군별 정보, 종풍부도 등	초지	종 구성, 미생물, 곤충, 설치류 개체 정보 등	화학정보	토양특성, 강수, 지표수, 대기 화학 등	생물	식물, 동물, 미생물 등 분포, 거체수, 서식지 상태 등
	수계	이화학적 특성, 용존기체, 염도, 물질농도 등	수계	알칼리도, 엽록소 함량, 용존기체, pH, 탁도 등	사막	종자생산량, desert ephemerals, 미생물 등	무척추동물	곤충 등	수계	수질, 유량, 수온 등
	토지	생태계 구조, LiDAR, 고도, LAI, 식생피복 등	토지	이온농도, 토심, 토성, 토질 등	습지	지하부 바이오매스, 양분 농도, 저생생물 등	척추동물	포유류, 조류 등	토지	이화학적 특성, 토양수분, 침식 상태 등
	생물	식물계절, 종 구성, 유전 정보, 병리학적 정보 등	식생	수관, 뿌리, 잎, 낙엽, 식물계절, 줄기 등 관련 지표	농지	다모작지수, 윤작 시스템, 비료 처리 반응, 작물 정보 등	식생	산림식생, 곡물 등	해양	해수 온도, 염도, 해양 생물 분포 및 다양성, 산호초 등
	194개 항목	620개 지표	88개 dataset	20개 parameter	75개 항목					
구축 시기	2019	2009	1988	1992	2002					

구축 비용	약 6,155억 원(447백만달러) ¹⁾	약 4,296억 원(312백만달러) ²⁾	약 1조 707억 원(780백만달러) ³⁾	-	약 291억 원 ⁴⁾
운영 비용	약 895억 원/년(최근 3년) ²⁾	23억원 이상 (1.6백만달러, 2020년 기준) ⁵⁾	-	-	약 30억 원/년 ⁵⁾
운영 인력	Battelle사 운영, 30개 이상 협력 기관	80명(상시관리), 78개 협력 기관	20개 이상 기관, 1,000명 이상	18개 기관	국가 연구재단, 95명(2020년 기준)
데이터 포털	https://www.neonscience.org/data	https://portal.tern.org.au/	cernbio.ib.cas.cn	https://eidc.ac.uk	https://catalogue.saeon.ac.za/?referrer=SAEON

1) National Science Foundation, 2019, "FY 2019 NSF Budget Request to Congress", National Science Foundation, USA.

2) Lateral Economics, 2021, "National Collaborative Research Infrastructure (NCRIS) spending and economic growth", Lateral Economics.

3) World Bank, 2003, "Implementation completion report (IDA-25220) on a credit in the amount of US\$50 million to the people's Republic of China for an environmental technical assistance project", Environment and Social Development Unit East Asia and Pacific Region.

4) Department of Science and Innovation, 2021, "South African Research Infrastructure Roadmap Research Infrastructure (RI) Proposal: South African Polar Research Infrastructure", Department of Science and Innovation, Republic of South Africa.

5) <https://www.tern.org.au/qldgov-coinvestment/> '퀸즐랜드 주정부의 연구 인프라 공동 투자 기금 중 1.6백만달러가 TERN에 제공됨'

2. 미국 NEON (National Ecological Observation Network) 사례 분석

1) 관측망 운영 목적 및 구성

미국에서 운영 중인 NEON은 대륙 규모에서 기후변화, 토지 이용 변화, 침입종 등에 의한 생태계 변화와 그 영향을 파악하고 예측하기 위해 구축되었으며 이를 위한 생태 정보 네트워크 인프라를 제공한다(그림 1). 관측 방법과 기기를 표준화하였으며 다양한 생태계(열대우림, 늪지, 사막, 도시 등)에 관측 타워와 센서를 설치하여 다량의 표준 데이터를 연속적으로 수집한다 (NEON, 2024).

미국에서는 1999년부터 과학자들을 중심으로 생물다양성 관측 네트워크를 비롯한 생태계 관측망의 개념이 논의되기 시작하였고 장기간 기획과정을 거쳐 2019년에 NEON 구축이 완료되었다. 구체적으로는 2000년부터 2005년까지 6년간 NEON의 개념을 정립하여 2006년 초 설립계획이 완성되었으며, 2006년부터 2010년까지 설계, 기획, 예산안 등에 대한 미국 과학재단의 검토를 거쳐 2011년 구축 승인이 완료되었다. 그리고 책임 운영사인 Battelle에서 2016년부터 2019년까지 총 81개 관측소를 순차적으로 구축하였다 (NEON, 2024).

〈그림 1〉 미국 생태계 관측망 NEON 사이트 위치 및 개요(NEON, 2024)



2) 관측데이터 및 활용

NEON에서 관측하는 데이터 항목은 대기, 생물화학, 생태수문, 토지피복 및 변화, 개체군 동태 등 분야의 총 194개 항목이다('24년 8월 기준). 미기상·플릭스 관측 타워에 설치된 자동관측기기를 통해 기상·기후, 탄소, 물, 에너지 순환, 토양 이화학적 특성 및 토양호흡, 식물계절 등을 관측하고 현장에서 주기적 직접 샘플링을 통해 토양미생물, 육상식물, 조류, 포유류, 진드기, 모기, 딱정벌레 등의 생물군집 변동을 조사한다. 원격탐사는 2~5년 간격, 자동관측은 연중, 샘플링은 현장 전문가에 의해 생육기 동안에 수행된다(NEON, 2024).

수집된 데이터는 전문 연구진과 기술진이 NEON 중앙데이터센터 및 소프트웨어를 활용하여 데이터를 표준화, 검·보정, 분석하는 과정을 거친 후 자체 데이터 포털을 활용해 제공된다. 이러한 기후생태 관측데이터는 생물다양성 추론, 종별 취약성 및 보호 대상종의 서식지 분석, NASA 기후자료와 함께 전 지구 생태계 동태 탐사 등에 이용된다(NEON, 2024). 또한 NEON Dimensions 라고 하는 NEON 자체 검색 페이지를 통해서 NEON 데이터를 활용해 출판된 논문, 간행물, 정책 문서 등을 확인할 수 있으며 '24년 8월 기준 828개의 논문, 209개의 데이터 세트, 145개의 정책 문서 등을 확인할 수 있다.

3) 운영체계

NEON은 미국과학재단(NSF)의 재정 지원으로 운영되며 민간 회사인 Battelle사가 위탁 운영하는데, 권역마다 한 개의 권역 현장사무소(Domain Site Facility, DSF)를 가지며 각각의 DSF는 권역 매니저와 현장 담당팀(생태 연구 및 기술 전문가로 구성)이 관리를 맡는다. 총 구축비용은 약 447백만 달러(현재 기준 약 6,155억 원)이며 '18년 이전까지 총 운영 및 유지관리비용은 약 83백만 달러(약 1,143억 원), 최근 유지관리 비용은 65백만달러/년(약 895억 원/년)이었다(NSF, 2018). 한편 NEON은 자체 연구기금을 이용한 연구 사업을 지원하기도 하는데, 1999년을 시작으로 현재까지 370개의 연구 사업이 수행되었거나 수행 중이다. 농업·수의학·식품과학, 산림과학, 생물

학, 환경과학, 생태학 등의 순서로 많은 분야별 지원이 이루어졌으며 누적 지원액은 약 3,580억 원이다(NEON Dimensions, 2024).

3. 호주 TERN (Terrestrial Ecosystem Research Network) 사례 분석

1) 관측망 운영 목적 및 구성

호주에서 운영하는 TERN은 생태계 관측 및 데이터 수집·통합·제공을 위한 플랫폼으로서 관측 센서, 조사, 장비 등을 이용해 데이터 생산과 분석이 이루어지는 관측소들의 집합이다(그림 2). TERN은 생태연구단체와 협의체들을 지원하며 장기생태관측을 위한 표준과 프로토콜을 수립·이행하고 자체 포털을 이용해 데이터 서비스 및 공유 인터페이스를 제공한다(TERN, 2024).

TERN은 호주 정부가 2009년 구축을 완료하고 2010년부터 운영 중이며 경관대륙 규모의 관측사이트 13개소, 지역 규모의 생태감시 일반사이트 800개소 이상, 조사지 규모의 생태과정조사 수퍼사이트 16개소로 구성되어 있다(TERN, 2024). 관측망 구성 체계에 관한 상세 정보는 <표 5>와 같다.

<그림 2> 호주 생태계 관측망 TERN 사이트 위치 및 개요(TERN, 2024)



〈표 5〉 호주 생태계 관측망 TERN의 구성 체계

관측소	목적	개소수	관측데이터	표준화 방법
경관대륙 규모 모니터링 (Landscapes CalVal sites)	원격탐사 기술을 이용하여 환경 모니터링 및 경관 관찰 수행. 경관 및 대륙 규모에서 호주 생태계를 특성화하고 모니터링	13 (대륙 규모)	현장, 항공원격탐사 (2011 ~)	현장조사 검·보정 실행 지침서 활용
생태감시 일반사이트 (Ecosystem surveillance sites)	주요 생태계에서 현장 기반 모니터링. 다양한 분류군에 대한 샘플링과 조사	> 800 (지역 규모)	토양, 식생, 샘플링 (2011 ~)	AusPlots Survey 프로토콜 활용
생태과정조사 수퍼사이트 (Ecosystem processes SuperSites)	소수의 대표 생태계를 대상으로 생물, 비생물적 요소에 관한 시계열적, 공간적 분포에 따른 상세 데이터 수집	16 (조사지 규모)	미기상, 에너지 흐름, 물, 탄소, 생물다양성, 토지피복, 식물계질 등	TERN 수퍼사이트 프로토콜, OzFlux 프로토콜 활용

2) 관측데이터 및 활용

경관대륙 규모 모니터링 검·보정 사이트에서는 현장조사와 함께 원격탐사 기법으로 경관 및 대륙 규모에서 생태계 특성을 모니터링하고, 생태감시 일반사이트에서는 공간적으로 연속성을 가지는 고정조사구에서 현장 직접 조사와 샘플링이 수행된다. 생태과정조사 수퍼사이트에서는 에너지, 물, 탄소, 생물군집의 변동에 초점을 맞춘 자동 관측과 조사를 통해 대규모 데이터를 수집한다(TERN, 2024).

특히 TERN의 수퍼사이트는 10~200km의 규모이며 여러 관측장비를 이용하여 대표생태계 유형별로 높은 시간적 및 공간적 해상도를 갖는 장기 생태계 데이터를 수집하고 핵심 데이터로서 미기상 플럭스, 식물의 생리적 작용, 장기 식생 및 동물상 모니터링 결과 등을 수집한다(TERN, 2024).

수집된 데이터는 전문 연구진과 기술진(Data services and Analytics team)에 의해 표준화, 검·보정, 분석 과정을 거쳐 자체 데이터 포털을 활용해 제공된다. 데이터는 주제(탄소 플럭스, 생태계 과정, 원격탐사 등)와 관측소 형태(고정플랫폼, 이동식 플랫폼, 각 사이트 등), 관측 기기(원격탐사, 각 센서), 지표(농업지표, 토지이용, 식생지표 등)별로 분류되어 있다. 이러한 데이

터는 호주 국가환경보고서 작성, 토지 관리를 위한 표준 프로토콜 개발, 식생 및 기후 분석을 통한 꿀 수확량 예측, 침입종에 의한 생물보안 및 위협요인 규명 등 정책적 또는 사회경제적으로 활용된다(TERN, 2024).

3) 운영체계

TERN은 호주 정부에서 운영하는 국가 협력 연구 인프라 전략 프로그램(National Collaborative Research Infrastructure Strategy, NCRIS)의 지원으로 운영되며, 호주연방과학산업연구기구(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, CSIRO), 퀸즐랜드 대학, 아들레이드 대학, 제임스쿱 대학 등에서 협업을 통해 연구를 수행한다. 특히 퀸즐랜드 대학은 NCRIS 재원을 받아 관리하며 TERN 프로젝트 운영에 관한 법적 책임을 가진다(TERN, 2024).

4. 글로벌 생태계 연구 인프라 네트워크(Global Ecosystem Research Infrastructure, GERI)

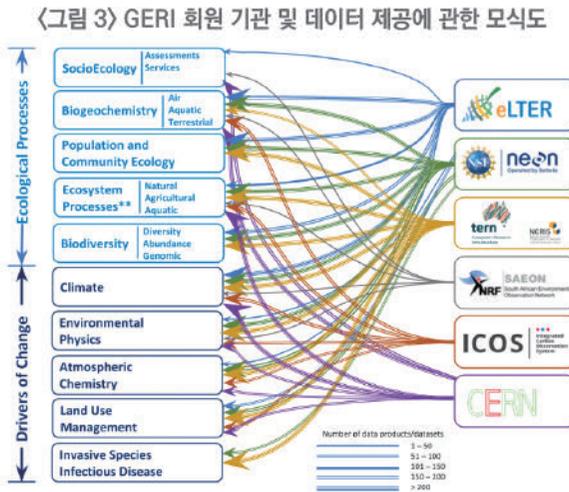
전 세계적으로 대규모의 체계적인 생태계 연구 인프라가 증가하면서 2020년 12월 8일에 아프리카, 아시아, 호주, 유럽, 북미 등의 대륙 규모 생태계 관측 인프라 운영 기관들이 MOU를 체결하고 GERI를 결성하였다(TERN, 2024). GERI는 현장 기반 연구 인프라 간의 통합 네트워크로서 전 세계 생물군계 전반에 걸쳐 지표가 되는 생태계의 기능과 변화를 더 잘 이해하기 위해 만들어졌으며 이를 통해 정치적, 관리적 의사 결정에 우수한 과학 정보를 제공하여 사회적 문제를 해결하고자 한다(TERN, 2024).

기후변화나 생물다양성 손실과 같은 전 지구적 문제를 해결하기 위해서는 각 국가 또는 대륙의 개별적 데이터 이외에도 국제적 협력과 데이터 공유가 필수적이다. 현재 GERI는 앞서 소개한 미국의 NEON, 호주의 TERN, 중국의 CERN과 더불어 유럽의 eLTER²⁾과 ICOS³⁾, 남아프리카공화국의 SAEON⁴⁾ 등

2) eLTER: European Long Term Ecosystem, critical zone and socio-ecological

6개 기관으로 구성되어 있다(Loescher et al., 2022).

6개 기관은 각각 기후, 토지 이용관리 등을 포함한 5개 변화 요인과 생물지구화학, 생태계 과정 등의 5개 생태학적 과정 요인에 대한 정보를 제공하고 있다(그림 3)(TERN, 2024). 한편, eLTER의 경우 eLTER RI (Research Infrastructure)라고 하는 유럽 전역을 포함하는 장기 생태 연구 사이트, 플랫폼, 데이터 서비스 포털 등을 결합한 인프라를 준비하고 있으며 현재 착수 단계에 있다(eLTER, 2024).



5. 국내 적용 시사점

전 세계적으로 미국, 호주, 유럽, 중국, 일본 등 주요 국가들은 이미 각자의 생태계 변화 관측 시스템을 구축하고 장기적으로 데이터를 수집·분석하고 있음을 확인하였다. 공개된 정보에 따라 가장 체계적인 관측 시스템을 가지고 있는 미국과 호주 사례를 집중적으로 분석하고, 이러한 관측 시스템을 운

systems Research Network, 주관 국가는 독일.

3) ICOS: Integrated Carbon Observation System, 주관 국가는 핀란드.

4) SAEON: South African Environmental Observation Network, 주관 국가는 남아프리카공화국.

영하는 기관 간의 네트워크 동향을 살펴봄으로써 국내 생태계 관측망의 필요성과 그 방향 설정에 있어 주요 시사점을 아래와 같이 확인하였다.

첫 번째는 생태계 관측의 공간적 규모와 우리나라의 여건, 즉 우리나라 기후와 생태계 특성, 구축 비용 및 운영관리의 효율성을 고려한 관측소의 개소수와 위치 관련 사항이다. 미국과 호주는 모두 대륙 규모로서 우리나라의 국토 면적과는 공간 규모에 있어 큰 차이가 있다. NEON의 경우 미국 대륙 전체를 20개 기후생태권역으로 나누고 각 권역별로 육상과 수생태계 관측기지를 3~5개 운영하고 있다. 호주 역시 대륙 규모의 관측기지 13개소와 조사지 규모의 수퍼사이트 16개소를 운영하고 있다. 따라서 우리나라의 면적, 기후대(온대와 난대), 대표 생태계유형(산림생태계, 수생태계, 도시생태계) 등을 고려할 때 NEON이나 TERN 수퍼사이트 수준의 관측기지는 5개소 내외가 적절할 것으로 보인다.

두 번째는 관측기지별 관측할 데이터 항목과 관측 방법에 관한 것이다. 미시적인 과정에서부터 경관 규모의 변화까지 생태계 과정은 시공간적으로 다층적이고 복잡하기 때문에 필수적인 관측 데이터 항목과 표준화된 방법론을 사전에 계획하고 관측망을 구축하는 것이 매우 중요하다. 기후변화에 따른 생태계의 반응과 생태계 구성요소 간 상호작용을 중요 관측 대상으로 볼 때, 탄소순환과 관련한 관측은 필수이며 식생 동태와 생물계절 변동 등 생태계의 변화와 건강성을 평가할 수 있는 관측항목 설정이 필요하다. 방법적으로 직접 현장 조사는 관측 규모에 한계가 있으며 항공 탐사만으로는 정밀한 조사가 어려운 부분이 있다. 따라서 현장 실측 데이터와 자동관측센서 기반 데이터, 항공 탐사를 통한 이미지 데이터 등을 연계하고 더 나아가서 모델링을 통해 생태계 변화를 예측할 수 있는 다층적 방법론 구축이 필요하다.

세 번째는 기존에 수행하고 있던 장기생태연구 및 다양한 생태조사와의 연계에 대한 것이다. 미국은 1980년부터 장기생태연구가 많은 연구 투자를 통해 발전되어왔는데 이와는 별도로 표준화된 생태계 관측망인 NEON을 구축 운영하면서 상호 보완적인 관계를 형성하고 있다(Jones and Driscoll, 2022). 호주 TERN의 경우, 수퍼사이트에서 생태계의 변화 원인과 방향을 연

속적·집중적으로 연구함과 동시에 원격탐사 기반의 경관 규모 모니터링 사이트를 운영함으로써 육상 조사 데이터와의 연결성을 높이고 있다. 따라서 우리나라 생태계 표준관측망 역시 일정 규모에 대한 장기생태연구가 지속적으로 수행될 수 있는 사이트임과 동시에 일부는 원격탐사를 병행하여 관측 범위를 확장할 수 있도록 설계가 필요하다. 현재 국내 장기생태연구 사이트 및 전국 자연환경조사 등의 다른 생태조사 결과는 관측소 내에서 자동관측장비를 통해 수집한 데이터와 원격탐사를 통해 수집한 경관 규모의 데이터를 연결하는 보완적 데이터로서 활용이 가능하다.

네 번째, 국외 생태계 관측망 운영 사례를 분석한 결과 모두 자체적으로 데이터 포털을 운영하고 있었으며 특히 NEON과 TERN의 경우 포털의 개방성, 데이터 분류 체계 등이 잘 갖추어져 있고 시각화·이미지화 되어 있어 편의성이 높았다. 국내의 경우 부처별로 데이터 포털이 존재하고 있으나 생태계 분야의 연속적인 데이터를 제공하고 있는 포털은 없다. 따라서 표준관측망에서 관측한 데이터와 부처별로 산재해 있는 데이터를 일정한 기준에 따라 표준화하여 제공하고 나아가 모델링과 연계하여 기후변화의 영향과 취약성을 시각화하여 보여줄 수 있는 자체 데이터 포털을 구비할 필요가 있다.

마지막으로 주요 선진 국가들의 관측망 체계를 벤치마킹하고 기술적 협력을 통해 관측 시스템의 안정적 운영을 도모해야 한다. 생태관측 데이터의 국내적 활용뿐 아니라 국외 자료와의 비교 및 글로벌 기후위기 대응을 위한 협력이라는 차원에서 NEON, TERN 등과의 네트워크를 구축해야 하며, 글로벌 생태계 연구 인프라 네트워크인 GERI에도 적극 참여함으로써 우리나라 표준관측망 데이터의 국제적 표준을 확보하고 연구 교류를 활성화하는 것이 중요하다. 쿤밍-몬트리올 생물다양성 협약에 따른 글로벌 생물다양성 프레임워크 실천목표 달성과 기후변화 대응을 위한 국가 온실가스저감목표 등 글로벌 목표의 실행에 있어서도 국제적인 연구 협력이 중요할 것으로 판단된다.

IV. 국가 생태계 표준관측망의 구축 방안

1. 생태계 표준관측망의 정의 및 관측내용

생태계 표준관측망은 '기후변화 등에 의한 생태계 변화와 적응 관련 조사·연구 인프라'로서 기후와 기상 변화에 반응하는 생태계 과정과 동태를 관측하는 시스템이라고 정의할 수 있다. 자연환경보전법 제36조(생태계의 연구·기술개발 등)에 따르면 정부는 '기후변화 등에 의한 생태계 변화와 적응 등에 관하여 연구 및 기술개발을 하여야(제1항)'하며 '기후변화에 따른 생태계의 변화 양상 및 적응·관리 사례, 기후변화 등에 의한 취약한 생태계 등에 대한 조사를 실시하여야 한다(제2항)'. 따라서 국내 생태계 표준관측망은 자연환경보전법에 따라 국가가 추진해야 하는 기후변화 영향 및 적응 연구 인프라로서 작동할 수 있어야 한다.

생태계 관측은 생태계 내의 변수와 과정을 체계적으로 측정하는 것으로 기록(recording), 맵핑(mapping), 조사(surveys), 채집(sampling) 등의 데이터수집 방법을 통해 이루어진다(Spellerberg, 2005). 따라서 표준관측망 구축에 앞서 생태계 관측을 통해 밝히고자 하는 생태계 과정과 영향 요인, 이를 측정하기 위한 적절한 데이터수집 방법과 관측 인프라의 구성 등을 설정하는 것은 의미있는 관측 결과를 생산하는데 중요하다.

기후변화에 반응하는 생태계 과정은 크게 에너지 흐름, 물순환, 물질순환, 생물군집 변화의 4가지로 나누어 볼 수 있다. 에너지 흐름은 생태계 내에서 광합성을 하는 식물들의 1차 생산성과 먹이사슬 관계 분석이 주요한 사항이다. 물순환은 강우와 유출, 토양과 지하로의 침투, 식생의 증발산 등 수문학적 요소들의 변동을 통해 분석하게 된다. 기후변화와 관련하여 가장 집중적으로 분석해야 하는 것은 탄소순환으로서 대기와 식생, 토양 등 탄소저장고 간의 이동 양상이다. 또한, 기후변화에 반응하는 생물군집의 변화는 다양하고 복잡한데, 생물종 서식지의 변동과 생물계절(phenology)의 변동이 대표적으로 분석해야 할 내용들이다.

2. 생태계 관측망 구축 및 운영 목표

생태계 표준관측망 구축 및 운영 목적은 다음의 세 가지가 될 것이다. 첫째, 국가 차원의 생태계 변동 특성을 관측하고 기후변화의 영향과 적응력을 집중 조사·연구하여 전 지구적 데이터와 비교 가능한 장기 시계열 표준 데이터를 생산하는 것, 둘째, 표준관측망의 데이터와 기초 인프라를 학계 또는 타 연구기관과 공유하거나 공동연구를 추진하여 활용도를 제고하는 것, 셋째, 표준관측망을 통해 수집한 자료를 생태계 기후대응 통합정보관리시스템⁵⁾ 구축의 핵심 자료로 활용하여 범부처 기후·생태 자료의 효율적 통합과 지속 가능성을 도모하는 것이다.

표준관측망 운영의 세부 목표는 첫째, 국가 생태계 현황과 변화 진단을 위한 표준 자료의 생산이다. 대표 생태계 유형에 대해 기준이 될 수 있는 데이터를 생산하고 기존 조사·관측 자료와 종합하여 현 상태와 건강성 등을 진단하고자 한다. 둘째, 국가 탄소흡수량 평가 및 산정수준 고도화를 위한 기초자료의 생산이다. 현재 우리나라 LULUCF⁶⁾ 부문 온실가스 배출량 산정 방법은 산림지와 농경지 부문이 Tier 2 수준이며 나머지는 초지, 습지, 정주지, 기타 토지 등은 Tier 1 수준에 머무르고 있다(온실가스종합정보센터, 2022). 따라서 관측망을 활용한 데이터 생산 및 모델링 변수 확보를 통해 고사유기물, 토양 탄소 등 미산정 배출·흡수원의 산정 수준을 고도화할 수 있을 것으로 기대된다. 셋째, 생물계절 변동 및 생태계 취약성 모니터링이다. 대표 지점에서의 관측을 통해 기후변화에 따른 식물계절, 곤충 생활사, 조류 부화시기 등 각종 생물계절 현상의 정상적 범위와 변동 범위를 측정할 수 있는 기준자료를 생성하고 극한기상 현상에 대한 생태계의 반응과 변동 모니터링을 통해 취약성을 진단하고자 한다.

5) 국립생태원에서 구축 중인 기후대응을 위한 생태계 통합 데이터 플랫폼.

6) 국가 온실가스 인벤토리의 토지이용, 토지이용변화 및 임업 부문.

3. 생태계 표준관측망의 구성

기후변화에 따른 생태계의 반응에 대한 체계적 측정·분석은 1) 생물적·환경적 요인을 종합적으로, 2) 고정된 지점에서, 3) 표준화된 방법을 통해, 4) 반복적·장기적으로 이루어져야 한다. 이러한 개념에서 표준관측망 내 각각의 관측소는 탄소, 물순환, 에너지 흐름을 관측하기 위한 플렉스타워와 토양 호흡과 온·수분, 식물계절 등을 모니터링할 수 있는 각종 자동관측장비를 기본으로 한다. 또한, 경관 규모의 생태계 변화를 확인하기 위한 원격탐사와 자동관측이 어려운 항목들에 대한 현장 직접 조사가 함께 이루어져야 한다. 생산되는 데이터에 대한 분석·관리, 표준화 방안과 국내외 연구개발 협력 네트워크도 생태계 표준관측망이 효과적으로 운영되는 데 있어 중요한 요소이다.

이러한 요소들을 고려하고 예산의 효율성을 고려할 때 국내 생태계 표준관측망은 관측규모·수준에서 차이가 있는 세 가지 유형의 관측소를 구성하는 것이 바람직하다(표 6). 먼저 대단위 면적에서 항공 탐사를 이용한 종합관측이 이루어지는 종합생태관측기지가 있다. 종합생태관측기지에서는 생물동태, 생물계절, 탄소·물·에너지 순환, 미기상, 수문·수질, 토양, 수목생물량 등의 항목을 현장 조사, 타워기반 자동관측, 항공 탐사를 통해 종합적으로 관측하며 세 개 수준의 관측 결과를 연계할 수 있는 방안을 모색할 수 있을 것이다.

둘째로 일반생태관측소에서는 생태계 유형별로 각각의 특성을 반영한 생물·환경적 요인에 대한 관측을 수행한다. 습지에서는 수생물동태와 메탄 플럭스, 도시에서는 꽃가루 발생과 질병매개생물 동태, 오염물질 등, 특이산림(제주 난대림 등)에서는 생물계절 및 동태 등을 관측하는 식이다.

마지막으로 이동식생태관측플랫폼에서는 산불, 곤충 대발생, 오염물질 유출 등과 같은 긴급 현안에 대응하여 각각의 상황에 필요한 생물, 토양 샘플링과 오염물질 분석 등을 실시할 수 있다. 이를 바탕으로 한 우리나라 생태계 표준관측망 개념 모식도는 <그림 4>와 같다.

〈표 6〉 생태계 표준관측망의 구성

	종합생태관측기지	일반생태관측소	이동식 생태관측플랫폼
정의	• 대단위 면적에 대해 생물·환경요인의 종합적 관측 및 표준 데이터 생산과 위성 분석·검증이 이루어지는 관측소	• 생태계 유형별(습지, 도시, 특이산림 등) 특성을 반영한 생물·환경적 요인의 관측이 이루어지는 관측소	• 긴급 현안(산불, 곤충 대발생, 오염물질 유출 등)에 대응하기 위한 이동식 관측소
특징	• 대면적, 여러 생태계 유형을 포함(예시. 산림+수계) • 항공 탐사 병행	• 단일 생태계 대상, 생태계 유형별 특성 반영	• 일반생태관측소와 규모 동일 • 이동식
관측 항목 (예시)	• 항공 탐사, 생물동태, 생물계절, 탄소·물·에너지 순환, 미기상, 수문·수질, 토양, 수목생물량 등	• (습지)수생물동태, 수계, 탄소·메탄 플럭스 • (도시)꽃가루 발생, 오염물질 • (특이산림)생물동태, 생물계절, 물질순환	• 생물, 토양 샘플링, 대기·수질 오염물질
모식도			

〈그림 4〉 생태계 표준관측망 개념 모식도



4. 데이터의 활용 및 협력

생태계 관측망을 통해 생산되는 데이터는 가능한 항목에 대해 통합 데이

터 포털을 활용해 실시간으로 제공함으로써 이상 변동 감지 기능과 데이터 활용도를 강화할 수 있다. 또한 특정 지역에 대한 실시간 모니터링을 통해 정책 근거 자료의 다양성과 시의성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

다음으로 기존 조사자료와 관측데이터를 입력자료로 하여 기후변화 영향 예측 모델을 개발하고 통합 데이터 포털을 통해 제공할 수 있다. 일례로 기상청 제공 데이터와 전국자연환경조사 결과, 표준관측망 데이터를 통합해 꽃가루 예측 모델을 개발할 수 있으며 아고산대 기후변화 취약종 예측, 기후변화에 따른 외래종 분포 변화예측 등도 가능할 것으로 생각된다.

마지막으로 3장 끝에서 전술하였듯이 기후변화는 전 지구적 환경문제로서 국제 공동 대응이 필수적이며, 2023년부터 시작된 IPCC 제7차 평가주기에서 중점적으로 고려하고 있는 사항 중 하나는 국내 연구진의 기후변화 국제 공동연구 참여율 제고이다(안지애, 2024). 따라서 생태계 표준관측망에서 생산한 데이터를 국내 생태조사자료 및 국외 생태계 관측망, 국제 장기생태연구, 동아시아-태평양 장기생태연구, AmeriFlux, AsiaFlux 등 유사한 시스템을 가진 타 시스템의 연구 결과와 공유·분석하여 국제 공동 대응력을 강화할 필요가 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기후변화에 따른 생태계의 반응과 변화 관측이 점점 중요해지고 있는 시점에서 국내 생태계 변화 관측·모니터링 현황을 진단하고 국외 선진사례 조사를 통한 시사점 도출을 통해 국가 생태계 표준관측망의 필요성과 구체적인 구축 방안을 제시하였다. 기후변화가 물질순환, 생물다양성 손실 등에 미치는 영향이 심화됨에 따라 생태계의 지속 가능한 관리를 위해 목적성을 가지고 설계된 인프라를 바탕으로 장기적이고 표준화된 기후생태 데이터를 수집하는 것이 시급하다. 미국과 호주 등 선진국들의 사례는 우리나라가 이러한 표준관측망을 구축하는데 있어 중요한 벤치마킹 대상이 될

수 있다. 특히 다양한 생태계 유형에 대한 종합적 관측을 통해 얻은 데이터는 국내뿐만 아니라 국제적 연구 협력에도 중요한 기초자료가 될 수 있다. 이를 위해서는 데이터 표준화와 첨단 관측장비 기반의 실시간 모니터링 체계, 데이터 제공 플랫폼 등이 필수적이며 이를 통해 기후변화에 대한 대응력을 강화할 수 있다. 따라서 정부와 연구기관은 이러한 시스템 구축에 대해 적극적인 투자와 협력을 추진해야 하며, 이를 통해 우리나라 생태계의 적응력과 회복력을 높일 수 있는 과학적 기반을 마련해야 한다.

■ 참고문헌 ■

- 안지애, 2024, “UNEA-6: 기후변화, 생물다양성 손실, 오염 및 폐기물” 개최 의의와 향후 전망, 『해외기후환경이슈리포트』, 서울: 한국환경산업기술원.
- 안상억·이승민·이효상·천호권, 2023, “충청북도 초강 유역의 관측자료를 바탕으로 한 유출특성분석,” 『한국산학기술학회』, 24(11), pp.116-123.
- 온실가스종합정보센터, 2022, 『2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서』, 충북: 온실가스 종합정보센터.
- 이보라·강완모·김충기·김지은·이창훈, 2017, “에디 공분산 기반의 플럭스 타워 관측자료를 이용한 국내외 산림과 농업 생태계 탄소 흡수량 분석,” 『환경영향평가』, 26(2), pp.127-139.
- 한국환경공단, 2024, <https://www.keco.or.kr/web/index.do>, [2024.08.13.]
- 환경부, 2024, 『물환경측정망 설치·운영 계획』, 세종: 환경부.
- CERN, 2024, <http://cernbio.ib.cas.cn/>, [2024.08.14.]
- Chen, P., S. Zhao, G. Cui, D. Lee, 2024, “Estimating carbon dioxide uptake in wetland ecosystems of Tumen River Basin using eddy covariance flux data,” *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology*, 27(3), pp.67-74.
- ECN, 2024, <https://ecn.ac.uk/>, [2024.08.14.]
- eLTER, 2024, <https://elter-ri.eu/>, [2024.08.14.]
- Herrick, B., 2019, “Ecological monitoring: Process and Purpose,” University of Wisconsin-Madison Arboretum, USA, <https://arboretum.wisc.edu/news/arboretum-news/ecological-monitoring-process-and-purpose/>, [2024.08.12.]
- Hur, J., K. Shim, B. Lee, Y. Kim, S. Jo, 2020, “Estimation and comparison of carbon

- uptake in rice paddy, dry cropland and grove in South Korea using eddy covariance flux data,” *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 39(4), pp.334-342.
- Jackson, S., 2023, “Repurposing long-term ecological studies for climate change,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(41), e2314444120.
- Jones, J. and C. Driscoll, 2022, “Long-term ecological research on ecosystem responses to climate change,” *Bioscience*, 72(9), pp.814-826.
- Loescher, H. W., R. Vargas, M. Mirtl, B. Morris, J. Pauw, X. Yu et al, 2022, “Building a Global Ecosystem Research Infrastructure to Address Global Grand Challenges for Macrosystem Ecology,” *Earth’s Future*, 10, e2020EF001696.
- NEON, 2024, <https://www.neonscience.org/>, [검색일: 2024.08.14.]
- NEON Dimensions, 2024, <https://www.neonscience.org/impact/papers-publications>, [검색일: 2024.08.14.]
- OKEON, 2024, <https://okeon.unit.oist.jp/>, [검색일: 2024.08.14.]
- Pörtner H. O., R. J. Scholes, A. Arneth, D. K. A. Barnes, M. T. Burrows, S. E. Diamond et al, 2023, “Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts,” *Science*, 380(6642), eabl4881.
- SAEON, 2024, <https://www.saeon.ac.za/>, [검색일: 2024.08.14.]
- Spellerberg, I., 2005, “Ecological monitoring,” In I. Spellerberg (Eds.), *Monitoring Ecological Change*, Cambridge University Press, pp.1-28.
- TERN, 2024, <https://www.tern.org.au/>, [검색일: 2024.08.14.]
- WEF, 2023, *The global risks report 2023*, World Economic Forum.
- Yang, H., M. Kang, J. Kim, D. Ryu, S. Kim, J. Chun et al, 2021, “The dynamics of CO₂ budget in Gwangneung deciduous old-growth forest: Lessons from the 15 years of monitoring,” *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 23(4), pp.198-221.

안지애: 고려대학교 환경생태공학과 대학원에서 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후생태연구실에 재직 중이다. 국가장기생태연구, 생태계 기후대응 표준관측망 구축에 관한 연구를 수행하고 있다(jiae_an@nie.re.kr).

주성배: 아주대학교 생명과학과에서 생태학 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후생태관측팀에서 재직 중이다. 생태계 기후대응 표준관측망에 관련된 업무를 수행하고 있으며, 주요 관심 분야는 생태계 내 영양관계, 먹이망 등이다(doctorjoo@nie.re.kr).

박정수: 서울대학교 생명과학부에서 생태학 박사학위를 취득하였고 현재 국립생태원에 재직 중이다. 생태계 기후변화 영향 관측을 위한 장기생태 연구를 수행하고 있다. 시계열 데이터 분석에 기반한 생태계 기후변화 영향분석이 주요 관심 분야이다(jspark@nie.re.kr).

이효혜미: 인하대학교에서 습지의 자연정화 기능에 호기심을 갖고 연구를 시작해 서울대학교 대학원에서 좀 더 깊이 습지에 대해 공부했다. 우리나라 전국에 있는 습지 발굴과 범담원 식물군집의 기능, 북극과 영국 고산 습지 식물 등을 탐구 분석하였고, 2014년부터는 국립생태원에서 외래종과 환경 개발, 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 연구하고 있다(hyohyemi@nie.re.kr).

박은진: 서울대학교 환경대학원에서 박사학위를 취득하고 현재 국립생태원 기후생태연구실장으로 재직 중이다. 주요 연구·관심 분야는 생태계 기후변화 영향, 생태계서비스 평가 등이다(parkej@nie.re.kr).

투 고 일: 2024년 09월 05일
심 사 일: 2024년 09월 20일
게재확정일: 2024년 09월 27일