

04

탄소중립을 위한 도시 탄소흡수원의 활용

강영은 국립경상대학교 조경학과 교수 (yekang@gnu.ac.kr)

도시 내 탄소흡수원 확충 중요성의 부각

기후변화 ‘완화(mitigation)’와 ‘적응(adaptation)’부문으로 추진되어온 우리나라 기후변화 대응정책은 2020년 미국 바이든 행정부의 파리협정 복귀와 EU, 중국, 일본 등 전 세계적인 국제적 협의를 발판 삼은 ‘탄소중립정책’의 기조로 도약의 시기를 맞이하고 있다. 이러한 탄소중립정책은 탄소배출량과 흡수량의 구체적인 기준과 목표의 설정으로, 국가 단위 계획, 규제, 지원 측면에서 정부의 적극적 개입이 요구된다.

우리나라 탄소중립정책의 큰 방향으로 제시된 ‘2050 탄소중립 추진전략’(2020년 12월)에서는 탄소 저감 중심의 기술적, 제도적 방안뿐만 아니라 산림, 갯벌 등을 통한 ‘탄소흡수 기능’ 강화를 주요 비전으로 제시하고 있다. 이는 인류가 생존하는 데 있어 실질적으로 탄소 배출을 ‘0’으로 조정한다는 것이 불가능하기 때문에, 탄소배출을 줄이는 동시에 기존 배출된 탄소를 상쇄할 수 있는 탄소흡수원의 역할이 더 중요해졌기 때문으로 풀이된다. UN HABITAT에 따르면, 전 세계 인구가 배출하는 탄소의 약 72~76%가 도시에서 발생하고 있으나, 지금까지 국내 탄소흡수원 확보정책·사업¹⁾은 대규모 산림지역에 의존해왔다. 즉, 도시계획적 차원에서 탄소흡수원 발굴 및 관리정책이 부족했던 것이 사실이다. 대신 국토 구조의 다핵화, 압축적 토지이용, 재생가능한 에너지를 사용·효율화함으로써 연계 되는 탄소저감 차원 정책이 우선시되어 왔다. 기존 산림자원을 기반으로 하는 탄소흡수원 확보 정책은 크게 신규 흡수원 확보를 위한 토지용도 변화와 산림경영 지원으로 추진해 왔기 때문에, 이를 다시 도시공간에 대입하면 도시 내 유희공간, 도시공원, 개발제한구역 등의 영역에서 녹지를 추가확보하거나 기능을 개선하는 측면으로 적극적인 탄소흡수원 확보전략을 모색해 볼 수 있다.

우리나라보다 상대적으로 주거를 위한 토지이용 밀도를 낮게 유지하고 있는 일부 서양 국가에서는 단독주택 등 도시 내 주거지역에서 탄소흡수원의 기능 검증 및 전략을 확장하는 시도(Nowak, Greenfield and Hoehn et al, 2013; Velasco, Roth and

1) 산림청, 탄소흡수원 증진 종합계획 5년마다 수립·시행(『탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률』 제5조).

Norford et al, 2016; Ariluomaa, Ottelin and Hautamäki et al, 2021)가 이어지고 있고, 이는 도시 내에서 탄소흡수원 확보의 중요성 및 잠재력을 함께 보여주는 결과라고 할 수 있다.

도시 범위에서 탄소흡수원을 확보하기 위한 전략적 공간으로는 도시공원, 개발제한구역 등을 들 수 있을 것이다. 하지만 2020년 이후 장기 미집행 공원의 해제, 인구가 집중되는 곳에 주거안정을 위한 개발제한구역 개발 압력 등으로 추가적인 탄소흡수원 확보는 점점 어려워지고 있다. 탄소흡수원의 유지·확장을 위해서는 정부의 관련 법 제정과 지자체의 의지도 전제가 되어야겠지만, 탄소흡수원의 유형, 혹은 영역별 탄소흡수원의 기능과 흡수 역량을 정확히 산정하려는 시도가 선행되어야 할 것이다.

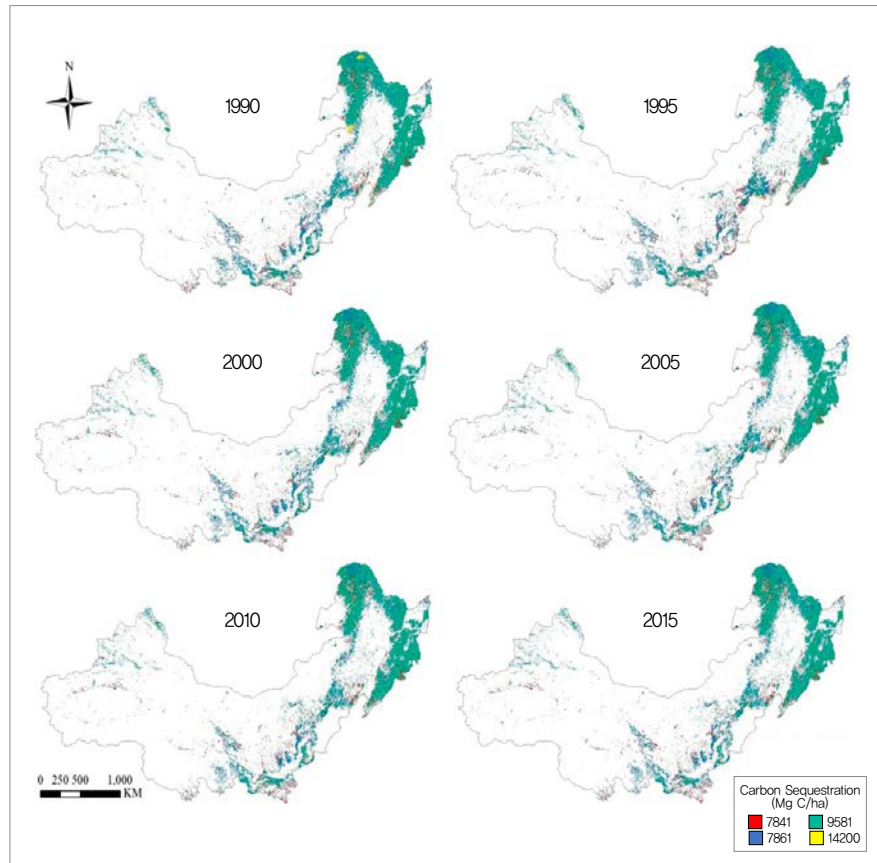
도시 내 탄소흡수원 산정의 흐름 및 한계 산정의 국내외 흐름 및 검토사항

일반적인 자연 탄소흡수원은 숲, 바다, 토양, 농지, 습지 등이며, 도시의 자연 탄소흡수원은 주로 도시숲, 토양, 수계 및 도시녹지공간을 포함하는 범위이다(Li, Shi and Bing et al, 2021). 도시의 녹지공간 중에서도 특히 나무는 대기 중 탄소를 격리(sequestration)시키고 저장(storage)하는 주요 흡수원으로서 큰 잠재력을 지니고 있다고 평가된다(Sharma, Pradhan and Kumari et al, 2021). 이러한 이유로 그간 ‘산림’을 대상으로 한 탄소흡수 역량에 대한 기준 설정과 평가에 대한 연구들이 꾸준히 축적되어 왔다. 산림의 탄소흡수 역량이 탁월한 이유도 있지만, 토지를 포함하는 영역 단위의 탄소흡수 역량은 이를 산정할 수 있는 표준식 부재와 탄소 순환에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 개별적으로 파악하기 어려웠기 때문이다.

산림을 대상으로 한 탄소저장, 흡수량 산정 연구들은 일반적으로 표준화된 산정식을 토대로 RS/GIS 기법 등을 활용해 광역적 범위를 다루거나(〈그림 1〉 참조), 흉고직경, 근원직경, 수고 등을 파악한 상대생장식을 활용해 미시적 범위에서 조사하는 방법으로 구분된다(한미경, 김경진, 양금철 2014; 김성훈, 김일권, 전배석 외 2018). 최근에는 산림에 대한 탄소흡수 능력뿐만 아니라 산림생태계가 제공하는 탄소흡수 서비스의 비용 및 경제적 가치를 계산하려는 시도(Chu, Zhan and Li et al, 2019)도 주목할 만하다.

산림의 탄소배출·격리량을 광역적 단위에서 표현하는 격자망 탄소흡수·저장지도는 미시적인 공간 범위를 다루기 이전에 국가, 지역 단위에서 탄소배출·격리량을 환산하고 공간·시간 단위를 시각적으로 비교하기에 유용한 자료라고 판단된다. 광역적 단위에서 탄소흡수·저장지도를 산출하기 위한 기본식에는 국립산림과학원이 제공하는 목재 기본밀도(D), 바이오매스 확장계수(BEF), 뿌리 함량비(R), 탄소 전환계수(CF) 등을 활용하는 것이 일반적이다. 즉, 해당 지표들은 산림 등 흡수원에서 부피 단위를 중량 단위(바이오매스)로 바꾸어 주는 역할을 하는 것이고(손영모, 김래현, 이경학 외 2014), 지표에 의한 탄소배

〈그림 1〉 탄소흡수공간 매핑 예시



자료: Chu, Zhan and Li et al. 2019, 386.

〈표 1〉 수목 유형별 바이오매스 전환계수

전환 인수	수목 종류	침엽수	낙엽수	혼합림
목재 기본밀도(D: basic wood Density)		0.46	0.68	0.57
바이오매스 확장계수(BEF: Biomass Expansion Factor)		1.43	1.51	1.47
뿌리 함량비(R: Root-shoot ratio)		0.27	0.36	0.32
탄소 전환계수(CF: Carbon Fraction)		0.5		
이산화탄소 전환계수(Carbon Dioxide Fraction)		44/12		

자료: 김성훈, 김일권, 전배석 외 2018, 127.

출원 산정식은 IPCC 등 국제표준방법을 준용하고 있다. 그럼에도 불구하고, 광역적 단위에서 격자망 탄소배출원 및 흡수원 지도는 그 완결성을 담보하기 위해 도전해야 할 과제들이 많다. 우선 각 수종의 탄소흡수 능력이 다를 수 있기 때문에 다양한 수종별 역량을 산정하여 표준화하는 작업이 선행될 필요가 있다. 또한 수목의 영급에 따른 흡수·저장 차이도

크고 토양과 기후의 영향에 따른 차이도 무시할 수 없기 때문에(Gregg, Elias and Alonso et al, 2021), 산정식 내 다양한 변수 혹은 가중치 고려 및 공간 간 오차를 줄이기 위한 해상도 상향 등의 방법으로 탄소배출·흡수지도의 불확실성을 저감시킬 수 있는 방안이 지속적으로 검토되어야 한다.

도시 탄소흡수원 산정 및 발굴을 위한 새로운 접근

도시 내에서의 탄소흡수원 확보는 다른 지역과 다르게 인구가 밀집되어 주거, 산업 등 다양한 기능을 수행하는 특성이 있다. 때문에, '산림' 자원 확보 외에도 도시기능을 유지하면서 탄소흡수기능을 수행할 수 있는 방안이 실험될 필요가 있다. 이러한 관점에서 최근 Li, Shi and Bing et al(2021)이 발표한 '콘크리트 건물의 탄소흡수기능을 증명'한 논문은 도시 내 탄소흡수원 발굴 및 유지에 있어 시사하는 바가 크다. 해당 연구에서는 중국 선양시를 대상으로 인공건물의 '탄소흡수' 능력이 산림과 같은 자연적 탄소흡수원의 하나로서 기능하는지 여부를 검증하였다. 분석 결과, 도시건축물의 탄소흡수량은 약 170만 1600t으로 토양 및 식생과 같은 동일한 규모의 자연 탄소흡수원 기능보다 출중했으며, 이는 연간 도시배출량의 4.39%에 해당하는 수준으로 나타났다(〈그림 2〉 참조). 도시건물이 탄소를 흡수하는 흥미로운 원리는 건물 재료의 알칼리성 산화물과 공기 중의 H₂O 및 CO₂가 탄산화되는 과정을 통해 이산화탄소를 흡수하게 되는 것으로 소개된다(Pacheco-Torgal, Shi and Sanchez et al, 2018). 이러한 원리에 의하면, 콘크리트 등으로 지은 인공건물이 총 주기적 관점(생산, 철거 2차 사용 등)에서 목재건물보다 탄소격리 효과가 높다는 것으로 해석되므로, 향후 다양한 실험 및 검증 등을 통해 탄소를 흡수하는 전략적인 방안이 될 수 있다.

상기의 방안이 전략적일 수 있는 이유는 기존 도시의 기능을 유지하는 동시에 탄소흡수원으로 기능할 수 있는 것뿐만이 아니라, 흡수 역량의 '수직'적 접근이 가능하기 때문이다. 그간 자연 탄소흡수원을 확장하는 방안은 토지를 추가로 확보하거나 토지의 용도를 전환하는 '수평'적 방안으로 이루어져 왔다. '기술' 발달의 부재도 이 한계에 영향을 주었겠으나, 다양한 시도 및 국가적 지원이 부족했던 이유도 있다. 도시 내에서 탄소흡수원을 확보하기 위한 '수직적'인 방법으로서 버티컬 가든, 즉 수직 정원도 적극적으로 유치하고 지원할 필요가 있다고 판단된다. 수직 정원은 도시 내에서 공간 한계의 극복을 넘어 주요 탄소흡수원으로 기능할 수 있을 뿐만 아니라, 도시의 미적 요인으로서 보행 만족도 증진이나 스트레스 감소 등 긍정적 효과를 발휘할 수 있다. 나아가 수직적인 탄소흡수원 확보에 '기술'이 더해지면 고도의 역량 증진도 가능하다. 독일의 스타트업 기업 중 하나인 'City Solutions'는 수직 정원인 'City Tree'를 개발하여 이끼 등 식물을 활용해 도심 속 중요한 탄소흡수기능 및 미세먼지 정화기능을 수행하며, AI 등 IoT 탑재로 이용 및

〈그림 2〉 City Tree 이미지



자료: <https://greencitysolutions.de/en/products/citytree/>

관리 편의성을 높인 것으로 주목 받았다. 자연 탄소흡수원인 수목의 대체 자원으로 주목받았던 이유는 이러한 관리의 편의성뿐만 아니라 미세먼지 정화 능력이나 탄소흡수 능력에서 기존의 수목보다 역량이 높은 것으로 검증받았기 때문이다.

일반적인 자연 탄소흡수원 이외에 다양한 탄소흡수원의 소개는 ‘인공’으로 구성된 대체물의 효용 가치가 모두 높다는 것을 피력하려는 것은 아니다. 하지만 본래의 도시기능을 유지·축소하면서 다양한 기능을 가질 수 있는 대체

자원들을 적극적으로 발굴하고 확장하는 것도 다양한 가치가 대립하는 상황에서 요긴한 수단이 될 수 있다.

도시 내 탄소 흡수원 확보를 위한 법·제도적 개선방안

탄소를 격리시키고 저장시키는 능력을 산정하는 과학적 접근 이외에 어떤 노력이 필요할까? 바로 법·제도적 개선방안을 모색하는 과정이자 결과일 것이다. 그 구체적인 내용으로는 도시 내 풍부한 탄소흡수원을 확보하기 위한 그린인프라 구축계획 마련, 수목 경영이나 민간공원·정원 등과 연계한 민간 인센티브, 탄소흡수원을 유지하고 확장하기 위한 R&D 지원, 공모사업을 통한 홍보 및 모델 발굴 등이 될 것이다.

그린인프라 기본계획 마련

기후위기의 영향으로 국토계획적 차원에서 ‘그린인프라’의 중요성은 높아지고 있으나, 현재 그린인프라 사업은 도시녹화사업 성격의 ‘개별 사업’ 중심으로 이루어지고 있는 한계를 보이고 있다. 그린인프라는 기존 생태 네트워크를 확장한 개념으로, 도시환경 개선과 기후변화에 대응하는 차원에서 부각되기 시작했다. 그린인프라의 효용 가치를 극대화시키기 위해서는 그린인프라를 구성하는 ‘핵심지역(hub)’과 ‘연결지역(link)’들이 단절되지 않고 연계되도록 하는 것이 핵심이다. 이러한 그린인프라를 유지·관리하기 위한 법정 계획으로 가장 연관성이 높은 것은 ‘공원녹지 기본계획’이지만, 10년 주기로 시행되는 국가 및 지자체 단위 계획으로 그린인프라를 확보·유지·관리하

기에는 역부족²⁾이라고 판단된다. 따라서 기존 공원녹지 기본계획에서 기존 공원녹지의 양적 확충을 질적 향상방안을 포함하는 개념으로 개편하거나, 새로이 그린인프라 기본계획을 제정하여 국가 단위에서 거점 탄소흡수원을 전략적으로 연계하려는 방안을 구체화할 필요가 있다.

신규 그린인프라 기본계획의 제정은 공간 중복성이 높은 기존 공원녹지 기본계획과 차별화할 필요가 있다고 판단된다. 현 공원녹지 기본계획이 도시공원녹지 양적 확충과 공원 녹지 수요공급 조사가 주가 된다면, 그린인프라 계획은 현상 분석을 위한 지역별 탄소흡수량 측정, 공원녹지의 질적 확충(접근성 높은 생활권 녹지 확보), 그린인프라 간 연계성 확보 측면(개발제한구역 등 거점 녹지 연계 등)에 주안점을 둘 필요가 있다.

도시 내 탄소흡수원 조성·관리지침 마련 및 지원

도시 내 탄소흡수원을 조성하고 관리하는 지침 마련 및 지원도 필수적이라고 판단된다. 앞서 검토한 것처럼 자연 혹은 인공 탄소흡수원의 역량을 파악하는 것도 중요하지만 장기적 관점에서 어떻게 관리하고 모니터링할 것인지에 대한 이슈도 매우 중요하다. 따라서 도시 탄소흡수원 관리지표, 비도시지역 토지이용 관리기준, 도시수목 경영정책 등의 도입을 통해 체계적인 탄소흡수원 조성 및 관리지침을 구체화하는 것이 필요할 것이다. 이러한 지침은 민간의 참여 활성화뿐만 아니라 탄소배출·흡수 인벤토리 등과 연계하여 탄소흡수원의 역량 강화와 추가 탄소흡수원의 확보, 세제지원 차등화의 기초 자료로 활용될 여지가 크다.

국토도시 탄소흡수원 확충사업 및 재정 지원

산림 등을 활용한 탄소흡수 역량 산정 연구에서 공통적으로 파악할 수 있었던 결과는 우리가 배출하는 탄소에 비해 자연 탄소흡수원으로 탄소를 상쇄하기에는 큰 한계가 있다는 것이었다. 따라서 민간의 참여를 적극적으로 유도하고 기술개발을 하는 방향으로 확충사업을 마련할 필요가 있다. 첫째는 산림 등 기존 우수 탄소흡수원의 수평·수직적 확충이 해당되고, 둘째는 전통적 탄소흡수원 외 대체적 자원으로 활용할 수 있는 기술개발 지원이 해당된다. 기존 국가 단위의 탄소흡수원 확보는 공공부지를 이용할 수밖에 없다는 한계가 있다. 우선 탄소흡수원 추가 확보방안에서는 민간부지에 ‘수목’을 유지·확장함으로써 지급하는 재정지원금을 확보하고 구체화할 필요가 있다. 특히 공원일몰제 대상 부지의 산림

2) 공원녹지 기본계획은 실행계획 단위에서 지자체별 공원을 다루므로 지자체 간 거점 녹지 연계를 고려하기 어렵고, 10만㎡ 이하 공원 조성이나 개발제한구역의 훼손지 복구와 같은 내용은 포함하지 않고 있음.

경영지원, 공원 입차제도와 같은 방향은 민간의 적극적 참여를 동반할 수 있는 주요 유인이 될 것이다. 다음으로 탄소흡수능력이 탁월한 기술개발, ‘압력 변동 흡착’, ‘기체 분리막’, ‘수산화물을 활용한 공기 내 직접 포집’ 기술 등을 국가 R&D, 창업, 국책연구기관의 과제로 지원함으로써 한정된 도시공간 내에서 탄소흡수 역량을 높일 수 있는 방안이 적극적으로 시도되어야 한다. 🌱

참고문헌

- 김성훈, 김일권, 전배석, 권혁수. 2018. 산림의 CO₂ 흡수량 평가를 위한 통계 및 공간자료의 활용성 검토: 안산시를 대상으로. *환경영향평가* 제27권 제2호: 124-138.
- 손영모, 김래현. 이경학, 표정기, 김소원, 황정순, 이선정, 박현. 2014. 한국 주요 수종별 탄소배출계수 및 바이오매스 상대성장식. 서울: 국립산림과학원.
- 한미경, 김경진, 양금철. 2014. 도시공원 식재 유형별 탄소저장량, 연간 탄소흡수량 및 토양호흡량 비교: 천안시 두정공원을 중심으로. *한국환경생태학회지* 제28권 제2호: 142-149.
- Ariuomaa, M., Ottelin, J., Hautamäki, R., Tuhkanen, E. and Mänttari, M. 2021. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry & Urban Greening* 57, 126939.
- Chu, X., Zhan, J., Li, Z., Zhang, F., and Qi, W. 2019. Assessment on forest carbon sequestration in the Three-North Shelterbelt Program region, China. *Journal of Cleaner Production* 215: 382-389.
- City Solutions. <https://greencitysolutions.de/en/products/citytree> (2021년 8월 5일 검색).
- Gregg, R., Elias, J., Alonso, I., Crosher, I., Muto, P., and Morecoft, M. 2021. Carbon storage and sequestration by habitat: A review of the evidence (second edition). *Natural England Research Report NERR094*, Natural England, York.
- Li, P., Shi, T., Bing, L., Wang, Z. and Xi, F. 2021. Calculation method and model of carbon sequestration by urban building: An example from Shenyang. *Journal of Cleaner Production* 317, 128450.
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E. and Lapoint E. 2013. Carbon sequestration and storage by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution* 178: 229-236.
- Pacheco-Torgal, F., Shi, C. and Sanchez, A. P. 2018. *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials*. Woodhead Publishing: Cambridge, MA.
- Sharma, R., Pradhan, L., Kumari, M., and Bhattacharya, P. 2021. Assessment of carbon sequestration potential of tree species in Amity University Campus Noida. *Environmental Sciences Proceedings* 3, no.1: 52.
- Velasco, E. Roth, M., Norford, L. and Molina, L. T. 2016. Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape and Urban Planning* 148: 99-107.