

자연기반해법의 탄소저장과 생물다양성의 공동·상쇄 효과 평가*

김다슬¹⁾ · 이동근²⁾ · 황혜미³⁾ · 허수정⁴⁾ · 윤석환⁵⁾ · 김은섭⁴⁾

¹⁾서울대학교 농업생명과학대학연구원 연구원 · ²⁾서울대학교 농업생명과학대학 정교수 ·
³⁾서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 학생 · ⁴⁾서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 학생 ·
⁵⁾일본 국립환경연구소 연구원

Assessment of Co-benefit and Trade-off Effects of Nature-based Solutions on Carbon Storage Capacity and Biodiversity*

Kim, Da-seul¹⁾ · Lee, Dong-kun²⁾ · Hwang, Heymee³⁾ · Heo, Su-jeong⁴⁾ ·
Yun, Seok-hwan⁵⁾ and Kim, Eun-sub⁴⁾

¹⁾Research Institute of Agriculture and Life Science, Seoul National University, South Korea, Researcher,
²⁾Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, South Korea, Professor,
³⁾Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University, South Korea, Student,
⁴⁾Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, South Korea, Student.
⁵⁾National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, Researcher.

ABSTRACT

This study developed a model to evaluate the co-benefits and trade-off effects between biodiversity and carbon storage capacity based on the implementation locations of nature-based solutions. The model aims to propose optimal implementation locations by using the conceptual idea of edge effects for carbon storage and connectivity for biodiversity. The co-benefits were considered by simultaneously taking into account two effects rather than a single effect. Trade-off effects were observed among optimal plans through a comparison of benefits. The NSGA-II multi-objective optimization algorithm was utilized, confirming the identification of Pareto-optimal solutions. The implementation patterns of Pareto-optimal solutions for green areas were examined. This study holds significance in proposing optimal locations

* 본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제 대응 환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(2022003570004).

First author : Kim, Daseul, Research Institute of Agriculture and Life Science,
Tel : +82-2-880-4885, E-mail : daslekim@snu.ac.kr

Corresponding author : Lee, Dong kun, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul National University,
Tel : +82-2-880-4875, E-mail : dklee7@snu.ac.kr

Received : 15 December, 2023. **Revised** : 19 January, 2024. **Accepted** : 7 January, 2024

by evaluating various co-benefits and trade-off effects of nature-based solutions. By advancing models based on this evaluation framework, it is anticipated that the assessment of co-benefits and trade-off effects among various benefits of nature-based solutions, such as climate change mitigation, enhancement of biodiversity, and provision of ecosystem services, can be accomplished.

Key Words : *NSGA-II, Pareto-optimal Solutions, Edge effects, Connectivity, Ecosystem services, Optimal implementation locations*

I. 서론

기후변화와 생물다양성의 손실 등 자연에 미치는 인위적인 변화에 대한 우려가 급증하고 있다(Folkard-Tap et al., 2019). 국제사회에서는 기후 위기에 대응하고 탄소 중립을 달성하기 위한 효과적이고 지속 가능한 해결책을 강조하고 있다(Debele et al., 2023). 특히, 2015년 파리협정과 Post-2020 신기후체제는 모든 국가가 기후변화 대응에 참여하도록 촉구하며, 이를 위해 생태계의 회복력 강화가 필요하다고 강조하고 있다(Johnson et al., 2022). 쿤밍-몬트리올 글로벌 생물다양성 프레임워크는 생물다양성을 회복하기 위한 자연 기반 해법을 강력하게 제시하며, 기후변화 완화, 생물다양성 증진, 생태계 서비스 등 다양한 혜택을 고려하고 있다(CBD, 2022). 즉, 기후, 생태계, 생물다양성, 그리고 인간 사회가 복잡하게 연결되어 있기 때문에 문제를 독립적으로 해결할 수 없음을 인식하고 있다. 이에 따라 IPBES와 IPCC는 기후변화와 생물다양성의 손실을 고려하여 최초로 공동 보고서를 발표하였다(Portner et al., 2021).

국내외에서 중요하게 다루고 있는 기후 위기, 탄소 중립, 생물다양성과 관련된 여러 환경 문제를 해결하기 위한 노력으로 자연기반해법(Nature-based solutions)을 통한 녹지 공간의 중요성이 강조되고 있다. 자연기반해법은 탄소흡수량 증진, 도시열섬 완화, 생물다양성 증진 등 다양한 효과를 발현할 수 있는 잠재적인 전략으

로 강조되고 있다(UNFCCC, 2016). 그러나 탄소흡수·저장 능력 증진만을 목적으로 구현한 자연기반해법은 생물다양성 보전 및 생태계 서비스 제공과 같은 다른 혜택을 간과하거나 과소평가할 수 있다(Ryfisch et al., 2023). 또한, 자연기반해법의 혜택의 양은 구현되는 공간적 특성에 따라 다를 수 있다(Deely et al., 2020). 예를 들어, 주변부 밀도가 낮고 잘 연결된 녹지 공간은 동물의 이동을 원활하게 하며, 생태적 상호작용의 기회를 제공한다(paudel et al., 2023). 이는 생태적 기능을 향상시켜 생물다양성과 높은 탄소흡수량을 제공할 수 있다. 이러한 요소를 통합함으로써 도시는 기후변화 대응, 생물다양성 강화, 인간의 건강 향상 등 도시환경에 다양한 이점을 제공할 수 있다.

선행연구에서는 도시녹지 조성으로 인한 정량적 평가 기반의 최적의 계획안에 대한 연구가 진행되었다. Zhang et al.,(2017)은 도시녹지의 냉각 효과를 증진시키기 위해 새로운 녹지공간을 최적으로 배치하는 것을 제안하였다. Yang et al.,(2017)은 도시 공간 설계로 녹시율을 증진시키기 위한 수목의 배치에 대해 분석하였다. Li et al.,(2017)은 수문학적 과정의 관점에서 유출량 감소를 위한 최적의 LID(Low Impact Development) 배치에 대한 연구를 수행했다. 하지만 기존 연구에서는 자연기반해법의 특정 목적을 최대화하기 위한 전략 및 계획에 집중되었으며, 각 이점을 복합적으로 고려한 최적의 위치를 제시하는 연구는 미흡하였다. 이러한 연구의 부족은 다양한 이해관

계자 선호도를 충족하고 지역적 지속가능성을 달성하는 데 어려움을 발생시킬 수 있습니다(Chen et al., 2014; Yoon et al., 2019).

본 연구는 자연기반해법 구현을 통해 생물다양성, 탄소저장량 간 공동·상쇄 효과를 평가하여 최적의 구현 위치를 제안하는 모델을 개발하였다. 탄소저장량은 녹지 주변 생태계 유형에 따라 값을 부여하였으며, 생물다양성은 녹지의 종 출현 확률과 연결성을 합산하여 평가하였다. 두 가지 요인의 공동효과를 고려하며 상쇄효과를 확인하기 위하여 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGA-II)를 활용하였으며, 다양한 녹지 패턴에서의 활용가능성을 검토하기 위해 가상공간을 설정하여 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 자연기반해법 유형

자연기반해법 유형은 생물다양성 및 생태계에 대한 기술의 적용 정도와 자연기반해법으로 인해 제공가능한 생태계서비스의 수준 정도에 따라 분류한 체계를 준수하였다(IUCN, 2016; Eggermont et al., 2015). 유형 1은 기존 자연이나 보호되고 있는 생태계를 더욱 효과적으로 활용하는 솔루션이고, 유형 2는 관리되거나 복원된 생태계에 대한 지속가능한 관리 프로토콜 혹은 절차 개발에 기반한 솔루션이며, 유형 3은 새로운 생태계를 생성하는 솔루션이다(Figure 1).

본 연구에서는 자연기반해법 유형 3에 해당하는 생태계 신규 조성을 대상으로 하였다. 신규 조성에 해당하는 자연기반해법의 수단에는 도시 숲 조성, 옥상 정원 조성, 공원 조성 등 종류가 다양하며 조성될 수 있는 식생 구조도 다양하다. 자연기반해법이 발휘하는 혜택은 수단과 식생 구조 등 다양한 변수에 따라 상이하지만, 본 연구에서는 산림 및 녹지 조성으로 정의하였다.

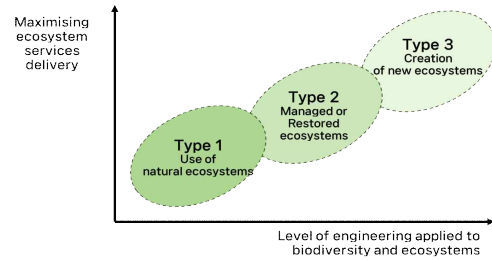


Figure 1. A typology of NbS showing three main categories of solutions (Eggermont et al., 2015)

2. 자연기반해법 혜택의 공간적 영향

산림의 탄소저장량은 내부와 주연부 간의 차이가 있다. 주연부는 식생의 고사율 증가, 미기후의 변화, 침입종의 도입과 같은 부정적인 영향을 증대시키고(Kim et al., 2012), 생산량과 기능을 감소시킨다. 생산량 감소는 식생이 저장할 수 있는 탄소의 양을 줄이는 것까지 이어진다(Sung et al., 2015).

파편화된 녹지 간의 연결성을 평가하는 것은 생물종 보전에 핵심적인 요소이다(McGuire et al., 2016; Dobrowski et al., 2021). 생물종 서식처 간의 연결성을 높여 생물 종이 이동하고 번식할 수 있는 공간을 제공하고 확장할 수 있으며 자연재해, 기후변화, 인간 활동, 또는 종간 경쟁 등의 위협에서 피하여 종을 유지하고 회복하여 생물다양성 유지 및 증진에 도움이 된다. 따라서 파편화된 녹지 간 연결성이 높을수록 생물다양성을 높게 평가할 수 있다.

탄소저장량은 주연부 효과의 개념을 도입하여 계산하였다. 새로운 녹지가 조성되었을 때, 4방향에 토지가 모두 녹지일 경우 1의 값이 부여되고 녹지 중 4방향 토지 중 한 방향이라도 비녹지와 접해있다면, 접경지로 정의하고 0.3의 값을 부여하였다. 비녹지의 경우 0이 부여된다. 따라서 탄소저장량은 계획안의 부여된 모든 값을 합산하여 평가하였다.

생물다양성은 서식지의 연결성과 종 분포 개념을 기반으로 평가되었다. 8방향의 녹지의 개

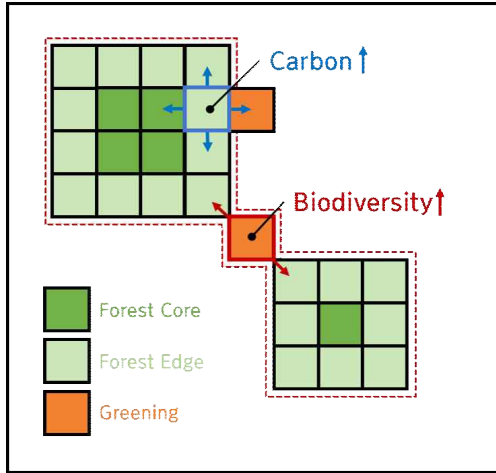


Figure 2. Effects of carbon storage capacity and biodiversity by implementation location

수를 합산하여 연결성을 계산하였다. 더불어, 종 분포를 고려하기 위해 연결된 녹지 패치의 종 분포 확률 합산 값으로 종 분포를 고려하였다. 종 분포 확률은 패치 크기에 비례하게 할당되었다(Figure 2).

3. 다목적 의사결정 지원 모델

본 연구에서는 탄소저장량과 생물다양성 2가지 효과를 동시에 평가함으로써 공동 효과를 고려하였다. 상쇄 효과는 구현되는 위치에 따라 발생하는 두 효과 간 계획안 간의 상쇄로 정의하였다. 이러한 공동-상쇄 효과 특성을 고려하기 위하여 다목적 최적화 알고리즘을 적용하였다.

NSGA-II(Deb et al., 2002)는 복잡한 문제에 대한 해결책을 효율적으로 탐색하고 발견하는데 유용한 도구로 활용되고 있다. NSGA-II는 제한된 자원, 비용, 면적 등 제약 조건에서 다양한 목적을 동시에 최대화하는 솔루션을 제시할 수 있고, 도출된 여러 개의 계획안을 통해 다양한 이해관계자의 목적을 충족시킬 수 있는 솔루션을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구 흐름은 Figure 3과 같다. NSGA-II는 초기 무작위로 해의 집합을 생성하고 해는 각각 목적함수에 대한 평가가 이루어진다. 본 연구에

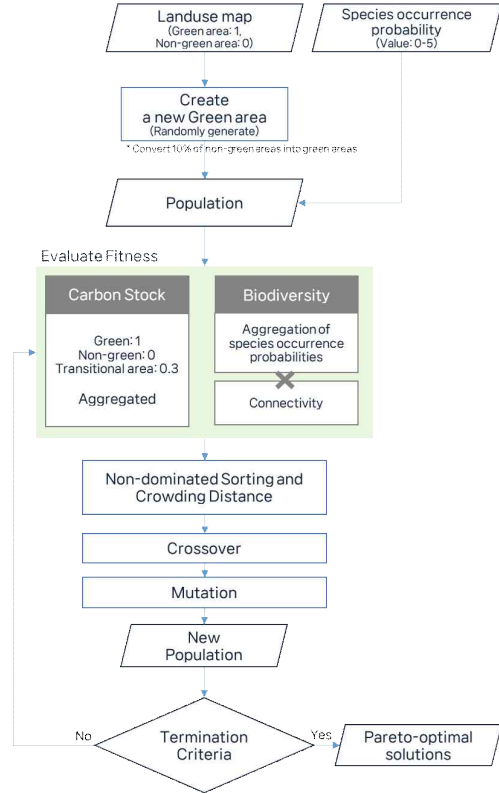


Figure 3. Flowchart

서는 탄소저장량과 생물다양성의 최대화를 목적으로 하며 수식 1과 수식 2는 각각의 목적함수를 나타낸다. 탄소저장능은 주변 셀의 녹지 여부에 따라 부여된 셀 당 탄소저장량을 합산하여 계산한다. 생물다양성은 연결성과 종 출현 확률 두 가지를 고려하여 평가한다. 연결성은 주변 녹지의 수를 통해 계산된다. 총 8방향의 셀 중 녹지의 개수를 연결성으로 평가하였다. 다만, 신규 조성된 녹지는 기존 녹지 사이의 징검다리 녹지 역할을 할 수 있도록 연결성 값을 최대 4로 제한하였다. 종 출현 확률의 경우 신규 조성된 녹지가 연결하는 패치 내 셀의 종 출현 확률을 합산하여 계산하였다.

$$Maximize \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f(x_{nm}) \quad \text{수식 1}$$

$$f(x_{nm}) = \begin{cases} 1 & \text{if all surrounding are green} \\ & \text{AND } x_{nm} \text{ is green} \\ 0.3 & \text{if all surrounding are not green} \\ & \text{AND } x_{nm} \text{ is green} \\ 0 & \text{if } x_{nm} \text{ is green} \end{cases}$$

$$\text{Maximize } \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M g(x_{nm}) \times h(x_{nm}) \quad \text{수식 2}$$

$$g(x) = \begin{cases} N, & \text{if } N \leq 4 \\ 4, & \text{if } N > 5 \end{cases}$$

(N은 주변 녹지의 수)

$$h(x_{nm}) = \sum_{(dx, dy) \in \text{patch}(n, m)} pr(n+dx, m+dy)$$

(pr(i, j)는 (i, j) 위치에 대한 종 출현 확률)

$$\text{patch}(i, j) = (dx, dy) | (i+dx, j+dy)$$

$$dx = (0, 1, 0, -1, -1, 1, 1, -1)$$

$$dy = (1, 0, -1, 0, 1, 1, -1, -1)$$

각각의 해에 대해 탄소저장량과 생물다양성이 평가되고 Non-dominated sorting을 통해 비종속적인(non-dominated) 해를 분류한다. 두 가지 목적 중 한 가지라도 다른 해에 대해 더 나은 값을 갖는 경우 비종속으로 간주된다. 비종속 정도에 따라 해들은 집합으로 분류되며, 각 집합은 비종속 수준에 따라 rank1부터 차례대로 등급이 매겨진다. 그 이후 부모 해를 선정한다. 동일한 rank 내에서 부모 해를 선정하기 위해서 crowding distance를 계산한다. 이는 주어진 등급 내에서 얼마나 다른 해들과 밀집되어 있는지를 나타낸다. 해의 다양성을 유지하기 위하여 crowding distance가 큰 해들을 우선적으로 부모 해로 설정한다.

선정된 부모 해로부터 자식 해를 생성한다. 자식 해를 생성하기 위해 교차와 변이를 수행한다. 본 연구에서는 파레토 최고 등급으로 선택된 부모 해 두 쌍끼리 신규 조성된 녹지의 40%의 위치

를 서로 교환하는 방식으로 교차(Crossover)를 수행하였다. 또한, 랜덤하게 선택된 60%의 셀의 유형을 녹지에서 비녹지 혹은 비녹지에서 녹지로 바꾸어주는 형식으로 변이(Mutation)를 적용했다. 전체 부모 해 200개 중 40%인 80개는 교차를 수행하였고 나머지는 변이를 적용하였다.

최적해를 도출하기 위해 충분한 반복 수를 적용하고자 반복 횟수를 점차 늘리면서 수렴을 확인하였다. 변화가 매우 적어 더 이상의 개선이 어려울 때 최적화에 도달한 것으로 간주하였다. 해당 최적화 알고리즘은 Python 소프트웨어를 활용하여 구현하였다.

4. 가상 공간 설정

가상 공간은 전체 20×20셀 크기로 설정하였다. 토지이용에 대한 가상 공간은 녹지(1)와 비녹지(0)로 구성하였다. 공동·상쇄 효과를 고려하고 녹지가 신규 조성되는 위치의 양상을 확인하기 위해서 큰 녹지 패치와 파편화된 녹지를 포함하여 구성하였다. 큰 녹지 패치는 7×7, 5×5 크기이며, 파편화된 녹지는 최소 1부터 최대 2×3 범위 내 크기로 구성했다.

출현 확률의 경우 패치의 내 종 출현 확률의 합이 그 패치의 면적과 비례하도록 할당하였다. 예를 들어, 크기가 6인 패치는 구성된 셀의 종 출현 확률을 합산하면 6이 된다. 종 출현 확률값의 범위는 편의를 위해 0에서 5로 설정하였다. 즉 생물 종 출현 확률값 1은 0.2를 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. 최적화 모델을 통한 파레토 계획안 도출

최적화 모델을 여러 번 실행하면서 나온 결과를 통해 더 이상 수렴하지 않고 안정적으로 값을 유지하는 반복 횟수를 경험적으로 판단하여 결정하였다. 이에 따라 2,000번 반복 횟수로 실행한 값을 최적 계획안으로 하였다(Figure 5).

최적화 모델 결과로 최적의 파레토 계획안을



Figure 4. Domain setup

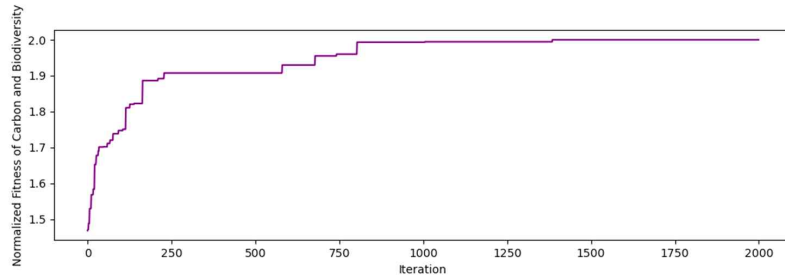


Figure 5. Fitness values with respect to iterations

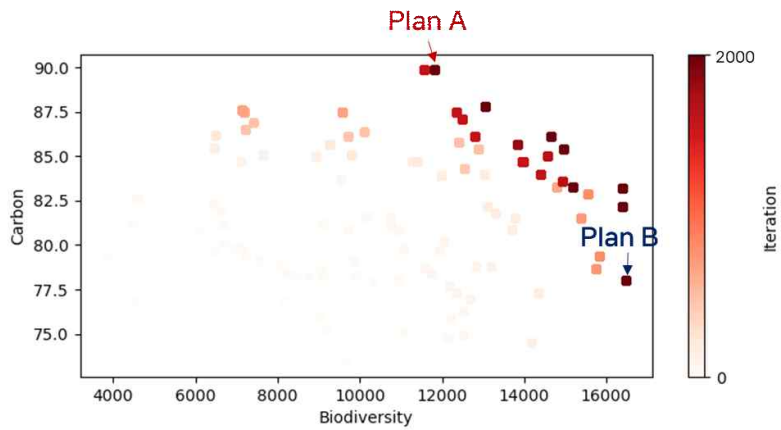


Figure 6. Scatter plot of Pareto-optimal solutions

도출하였다. 비녹지 셀의 10%를 녹지를 조성할 때, 계획안 간 탄소저장능과 생물다양성 증진 효과에 상이한 퍼포먼스를 확인하였다. 예를 들어, A 계획안은 탄소저장과 생물다양성이 각각 89.9와 11,823.5로 도출되었다. A 계획안과 동일한 비율로 녹지를 조성하였음에도 불구하고,

B 계획안은 탄소저장과 생물다양성이 각각 78.0과 16,487.6으로 도출되었다(Figure 6).

2. 녹지 패턴에 따른 구현 위치 양상 확인

녹지 패턴에 따른 구현 위치 양상을 분석한 결과, Figure 6에서 나타난 파레토 최적 계획안 A는

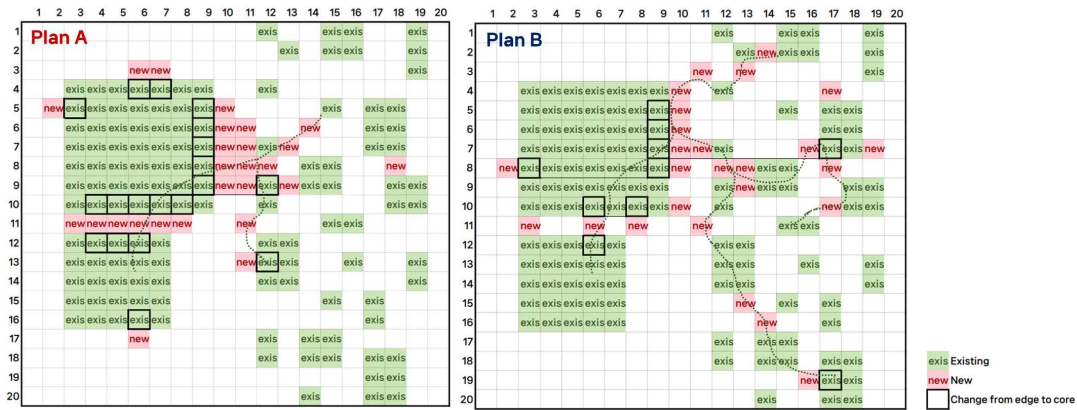


Figure 7. Pareto-optimal Plan

탄소저장 증진 효과를 극대화하기 위해 큰 패치 주변의 주변부를 최소화하고 있다(Figure 7). 계획안 A에서는 총 19개의 셀이 접경지에서 녹지 내부로 변경되었다. 특히, 가상공간의 좌측 패치 면적이 큰 두 패치 사이인 (4, 11), (5, 11), (6, 11), (7, 11), (8, 11) 위치에 녹지가 신규 조성되면서 주변 8개의 접경지가 녹지 내부로 변경되었다. 동시에 해당 위치에 신규 조성된 녹지는 내부 녹지로 탄소저장량을 효율적으로 높였다. 또한, 가장 큰 7×7 패치의 우측에 녹지가 집중적으로 조성되어 탄소저장능을 높이고자 하는 패턴이 나타났다. 동시에 해당 패치는 생물다양성 증진 효과를 위하여 기존 7개의 녹지 패치가 연결되었다.

생물다양성 증진 효과를 최대화하는 파레토 최적 계획안 B는 작은 녹지 패치 간의 연결성을 높이기 위한 양상을 보였다. 계획안 B의 신규 조성된 녹지는 가장 큰 패치를 포함하여 4개의 셀 이상으로 구성된 패치와 모두 연결된 것으로 확인되었다. 즉, 16개의 패치가 연결되었다. 특히, (10, 10), (11, 11), (13, 15), (14, 16) 등의 위치에 녹지가 신규 조성되면서 기존 녹지 패치 간의 연결성을 높였다.

기존 접경지에서 녹지 내부로 변경된 셀은 계획안 A는 19개, 계획안 B는 10개이며 연결된 패치의 수는 계획안 A는 7개, 계획안 B는 16개이다. 이는 계획안 간의 상쇄 효과를 보여준다.

계획안 A는 B에 비해 탄소저장 증진에 효과적이거나 생물다양성 증진 효과가 적다. 반대로 계획안 B는 A에 비해 생물다양성 증진에 효과적이지만 탄소저장 증진 효과는 적다. (10, 4), (10, 5), (10, 6), (10, 7), (10, 8), (11, 7)와 (6, 11), (11, 11) 등의 위치는 계획안 A와 B에서 모두 녹지가 조성된 위치이다. 이 위치는 녹지는 주변부를 줄이면서 기존 녹지 간의 연결성을 높이고자 하는 공동 효과가 고려된 것으로 해석할 수 있다(Figure 7).

3. 핵심지역 도출

최적 계획안들의 신규 조성된 위치를 비교하여 신규 조성지로 선택된 셀의 빈도를 분석하였다. 총 8개의 파레토 최적 안이 중 모든 안에서 신규로 조성된 셀은 총 4개이며, 이들은 (10, 6), (13, 9), (11, 11), (6, 11)에 분포한다. 특히, 가장 큰 패치와 하단의 패치와의 사이인 (3, 11), (4, 11), (5, 11), (6, 11)은 높은 빈도로 신규 녹지 셀이 조성되었다. 이 위치들에 신규 조성되면 주변의 2개 셀의 접경지가 동시에 녹지 내부로 전환되면서 신규 조성된 녹지 역시 내부로 분류되기 때문에 탄소저장 능력 향상에 효과적이다. 또한, (11, 7), (10, 7) 등도 높은 빈도로 신규 조성되었다. 이 부분은 파편화된 패치와의 연결성 증진에 효과적이다(Figure 8).



Figure 8. Frequency of New Created Locations

셀의 빈도를 분석으로 빈도가 높은 지역은 탄소 저장 능력과 생물다양성을 동시에 고려한 우선순위 지역으로 제안할 수 있다. 또한, 추후 신규 조성 뿐만 아니라 생태 복원이나 보전지역 우선순위를 도출하는 데에도 적용될 수 있을 것이다.

V. 결 론

본 연구는 자연기반해법의 다양한 공동·상쇄 효과를 평가하여 최적의 위치를 제안하는데 의의가 있다. 이러한 평가 프레임워크를 활용하여 기후변화 완화, 생물다양성 증진, 생태계서비스 제공 등 다양한 자연기반해법 발휘하는 혜택 간의 공동·상쇄 효과 평가가 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 자연기반해법의 공동·상쇄 효과를 평가하여 최적의 위치를 제안하는데 의의가 있으나, 본 연구는 아래와 같은 한계점이 있다. 첫째로 자연기반해법을 하나의 산림 및 녹지를 조성하는 것으로 정의하였으나 자연기반해법은 녹지 조성 이외에 잘 보전된 자연을 보호지역으로 설정하거나 다른 토지이용으로 전환되는 것을 방지하는 행위 등 다양한 행위가 포함된다. 따라서 추후 연구에서는 자연기반해법의 다양한 행위를 상세히 고려할 수 있도록 모델 보완이 필요하다.

둘째, 생물다양성과 탄소저장능 평가 방법에 있어 주연부 효과 및 연결성의 개념을 단순화하여 적용하였다. 이러한 간소화된 접근은 모델의 이해를 돕고 위치에 따른 공동·상쇄 효과를 확인하는데 효율적이고 효과적이었으나, 실제 세계에 도입하기 위해서는 공간적 상호작용과 생태계 유형에 따른 다양한 평가 방법과 모델링 기법의 활용이 요구된다.

셋째, 적용된 지역은 생태계 유형을 단순화한 가상의 공간으로 공간적 양상은 확인하였으나 실제 도시 및 환경에 적용되지 않았다. 실제 도시 및 환경에 대한 데이터를 활용하여 현실적으로 도입하여야 한다.

본 연구에서 제안하는 기초 모델을 도시 및 환경 계획에 적용하기 위해서 자연기반해법의 다양한 유형들에 대한 동적 영향을 정량적으로 평가하는 산정식이 필요하다. 다양한 자연기반해법과 동적 평가 방법을 적용한다면 실제 도시 및 환경계획 수립에 지원가능한 유용한 모델로 활용도가 높을 것으로 기대된다.

Reference

- Allen, C. D. · A. K. Macalady · H. Chenchoumi · D. Bachelet · N. McDowell · M. Vennetier · T. Kitzberger · A. Rigling · D. D. Breshears · E. H. (Ted) Hogg · P. Gonzalez · R. Fensham · Z. Zhang · J. Castro · N. Demidova · J. H. Lim · G. Allard · S. W. Running · A. Semerci and N. Cobb. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 259(4) : 660-684.
- Cohen-Shacham, E., G. Walters, S. Maginnis, and C. Janzen. 2016. Nature-based Solutions to address global societal challenges.
- Convention on Biological Diversity. 2022. Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework

- CBD/COP/15/L25.14 <https://www.cbd.int/conferences/2021-2022/cop-15/documents>
- Chen, W., Carsjens, G. J., Zhao, L., & Li, H. 2015. A Spatial Optimization Model for Sustainable Land Use at Regional Level in China: A Case Study for Poyang Lake Region. *Sustainability*, 7(1) : 35-55.
- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6:182-197.
- Debele, S. E., Leo, L. S., Kumar, P., Sahani, J., Ommer, J., Bucchignani, E., Vranić, S., Kalas, M., Amirzada, Z., Pavlova, I., Shah, M. A. R., Gonzalez-Ollauri, A., & Di Sabatino, S. 2023. Nature-based solutions can help reduce the impact of natural hazards: A global analysis of NBS case studies. *Science of the Total Environment*, 902 : 165824.
- Deely, J., Hynes, S., Barquín, J., Burgess, D., Finney, G., Silió, A., Álvarez-Martínez, J. M., Bailly, D., & Ballé-Béganton, J. 2020. Barrier identification framework for the implementation of blue and green infrastructures. *Land Use Policy*, 99 : 105108.
- Dobrowski, S. Z., Littlefield, C. E., Lyons, D. S., Hollenberg, C., Carroll, C., Parks, S. A., Gage, J. 2021. Protected-area targets could be undermined by climate change-driven shifts in ecoregions and biomes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 198. doi:10.1038/s43247-021-00270-z
- Eggermont, H., E. Balian, M. Azevedo, V. Beumer, T. Brodin, J. Claudet, B. Fady, M. Grube, H. Keune, P. Lamarque, K. Reuter, M. Smith, C. Ham, W. Weisser, and X. Roux. 2015. Nature-based Solutions: New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *Gaia: Ökologische Perspektiven in Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaften* 24:243-248.
- Folkard-Tapp, H., Banks-Leite, C., & Cavan, E. L. 2021. Nature-based Solutions to tackle climate change and restore biodiversity. In *Journal of Applied Ecology*. 58 : 2344-2348.
- Johnson, B. A., Kumar, P., Okano, N., Dasgupta, R., & Shivakoti, B. R. 2022. Nature-based solutions for climate change adaptation: A systematic review of systematic reviews. *Nature-Based Solutions*, 2 : 100042.
- Kim, E., Song, W., & Lee, D. 2012. Forest Fragmentation and its impacts: A review. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, 15(2):149-162. (in Korean)
- Li, J., Huo, H., Guo, R., Liu, B., Li, L., Dan, W., Xiao, X., Zhang, J., & Shi, B. 2017. Facile and efficient access to Androst-17-(1',3',4')-pyrazoles and Androst-17β-(1',3',4')-pyrazoles via Vilsmeier reagents, and their antiproliferative activity evaluation in vitro. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 130 : 1-14.
- McGuire, J. L., Lawler, J. J., McRae, B. H., Nuñez, T. A., & Theobald, D. M. 2016. Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7195-7200. doi:doi:10.1073/pnas.1602817113
- Paudel, S., & States, S. L. 2023. Urban green spaces and sustainability: Exploring the ecosystem services and disservices of grassy lawns versus floral meadows. *Urban Forestry and Urban Greening*. 84 : 127932.
- Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Armeth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W. L., Diamond, S.,

- Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ngo, H. T. 2021. IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. IPBES and IPCC. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4782538>
- Ryfisch, S., Seeger, I., McDonald, H., Lago, M., & Blicharska, M. 2023. Opportunities and limitations for Nature-Based Solutions in EU policies – Assessed with a focus on ponds and pondsapes. *Land Use Policy*, 135 : 106957.
- Sung, S., D. K. Lee, and Y. Mo. 2015. Comparison of Carbon Stock Between Forest Edge and Core by Using Connectivity Analysis. *Journal of Korean Society of Rural Planning* 21:27-33. (in Korean)
- UNFCCC. 2016. Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties.
- Yang, A. S., Juan, Y. H., Wen, C. Y., & Chang, C. J. 2017. Numerical simulation of cooling effect of vegetation enhancement in a subtropical urban park. *Applied Energy*, 192 : 178-200.
- Yoon, E. J., Kim, B., & Lee, D. K. 2019. Multi-objective planning model for urban greening based on optimization algorithms. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40 : 183-194.
- Zhang, Y., Murray, A. T., & Turner, B. L. 2017. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona. *Landscape and Urban Planning*, 165 : 162-171.