

TNFD의 LEAP 접근법 및 시스템 사고에 기반한 도시공원의 유지관리 활동 개선방안 연구[†]

- 월드컵공원을 대상으로 -

A Study on the Improvement of Urban Park Management Activities Based on TNFD's LEAP Approach and Systems[†]

- Focused on World Cup Park -

김지우*, 박동현**, 전진형***

*고려대학교 일반대학원 환경생태공학과 석사, **고려대학교 환경생태공학부 학사과정, ***고려대학교 환경생태공학부 교수

Kim, Ji-woo*, Park, Dong-hyun**, Chon, Jin-hyung***

*Master of Science, Dept. of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University

**Undergraduate Student, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

***Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

Received: March 23, 2025

Revised: May 1, 2025 (1st)

July 24, 2025 (2nd)

Accepted: July 24, 2025

3인인명 심사필

Corresponding author :

Jin-hyung Chon

Professor, Division of

Environmental Science and

Ecological Engineering, Korea

University, Seoul 02841, Korea

Tel.: +82-2-3290-3621

E-mail: jchon@korea.ac.kr

국문초록

도시공원의 유지관리 활동은 생물다양성과 생태계 서비스에 직접적인 영향을 미쳐, 지속가능한 공원 관리를 위한 체계적인 평가가 필요하다. 본 연구에서는 월드컵공원을 대상으로 TNFD(The Taskforce on Nature-related Financial Disclosures)의 LEAP(Locate, Evaluate, Assess, Prepare) 접근법을 적용하여 유지관리 방식이 생물다양성에 미치는 영향을 분석하고, 지속가능한 유지관리 전략을 도출하고자 하였다. 먼저, Locate 단계에서는 생물 다양성과 연계되는 월드컵공원의 유지관리 활동의 주요 변수를 도출하였다. Evaluate 단계에서는 인과순환지도를 활용하여 유지관리 요소 간의 피드백 구조를 분석하였으며, Assess 단계에서는 통합적 분석을 통해 유지관리 방식이 형성하는 위험요소와 기회요소를 도출하였다. 마지막으로 Prepare 단계에서는 파나키(Panarchy) 개념을 적용하여 부정적 순환(R 루프)을 억제하고 긍정적 순환(B 루프)을 강화하는 방향으로 유지관리 전략을 제시하였다. 연구 결과, 위험 요소인 살충제 사용, 과전정, 온실가스 배출 등은 월드컵공원 유지관리에서 악영향을 강화시키는 순환 루프로 나타났으며, 기회 요소인 자생종 재식재울 증가와 유기비료 활용은 지속가능한 공원 시스템의 균형을 유지하는 요소로 나타났다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 파나키의 리볼트, 리멤버 개념을 적용하여 지속가능한 유지관리 방안을 제시하였다. 연구 결과는 조경 분야에서 TNFD를 활용한 도시공원 유지관리의 체계적 평가 및 지속가능한 관리 전략 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 인과순환지도, 생물다양성 보전, 생태계 서비스, 지속가능한 조경 관리, 파나키

ABSTRACT

Urban park maintenance activities exert a significant influence on biodiversity and ecosystem services, necessitating a systematic evaluation to ensure sustainable management. This study applies the LEAP (Locate, Evaluate, Assess, Prepare) framework of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures (TNFD) to analyze the impact of maintenance practices on biodiversity and to develop sustainable management strategies, with World Cup Park as a case study. In the Locate phase, key maintenance variables of World Cup Park related to biodiversity were identified. The Evaluate phase employed causal loop diagrams to analyze feedback structures among maintenance factors, while the Assess phase integrated these analyses to identify risk and opportunity factors within the maintenance system. In the Prepare phase, the Panarchy concept was applied to mitigate negative reinforcement loops (R-loops) and strengthen positive reinforcement loops (B-loops) to establish a sustainable management strategy. The findings indicate that risk factors, including pesticide use, excessive pruning, and greenhouse gas emissions, form negative feedback loops that exacerbate adverse effects on biodiversity. Conversely, the replanting of native species and the increased use of organic fertilizers were

[†]본 논문은 OJERI 연구비 지원으로 수행되었습니다. (Supported by OJERI Resilience Institute, Korea University).

identified as key opportunities for maintaining ecological balance within the park system. Based on these findings, this study proposes a sustainable maintenance strategy incorporating the Panarchy concepts of Revolt and Remember. The results provide a theoretical foundation for the systematic evaluation of urban park maintenance practices using the TNFD framework and contribute to the development of sustainable management strategies within the field of landscape architecture.

Keywords: Causal Loop Diagram, Biodiversity Conservation, Ecosystem Services, Sustainable Landscape Management, Panarchy

1. 서론

1.1 연구 배경과 목적

자연은 물, 공기, 생물, 토양 등으로 구성된 생태계로, 사람들에게 생활과 경제활동에 필수적인 다양한 생태계 서비스를 제공하는 자연자본(natural capital)이다. 경제협력개발기구(OECD, 2021)에 따르면 전 세계 GDP의 44조 달러(약 50%)가 자연자본에 의존하고 있으며, 이는 자연자본 손실이 경제 전반에 미치는 파급효과의 심각성을 보여준다. 즉, 자연자본은 사회와 경제의 지속가능성을 뒷받침하는 중요한 역할을 하고 있으며(구경아 등, 2021), 생물다양성에 의해 그 가치를 유지한다(이현우 등, 2015). 생물다양성은 생태계 내 상호작용을 통해 생태계 안정성과 복원력을 보장하고, 생태계 서비스의 질과 양을 결정짓는 핵심 요소로 작용한다. 따라서 생물다양성 감소는 생태계 기능의 약화와 자원 고갈, 기후 변화와 같은 복합적인 문제를 초래하며, 장기적으로 지속가능성과 생태계의 수용능력에 악영향을 미쳐 삶의 질이 감소되는 결과를 낳는다(이훈중, 2021). 이러한 이유로 자연자본을 활용하는 기업이 자연을 다루는 것은 사회적 책임을 넘어서 기업 자체의 핵심적인 리스크로 인식되고 있다.

전세계적으로 생물다양성을 보전하기 위하여 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity) 당사국총회에서 2011년부터 2020년까지 생물다양성 손실을 줄이고 생태계 보전을 강화하기 위해 설정된 20개의 구체적인 목표를 설정하였다. 이를 통해 생물다양성 보전, 지속 가능한 이용, 그리고 생태계 서비스 증진을 목표로 하는 아이치 목표(Aichi targets)를 수립하며 생물다양성 보전을 위하여 노력하였다(구경아 등, 2021). 그러나 아이치 목표 달성도 점검 결과, 20개의 목표 중 6개의 목표에 대해서만 부분적으로 달성하여 이행이 미흡한 것으로 평가되며(Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2020), 구체적이고 실행 가능한 전략의 필요성이 대두되고 있다. 이런 맥락에서 자연에 대한 의존, 영향, 리스크와 기회에 대한 정보를 체계적으로 평가하고 공개하는 국제적 기준으로 TNFD(the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures)가 등장하게 되었다(TNFD, 2023a). TNFD는 자연 자본 손실과 관련된 문제에 대해 체계적으로 평가하고 관리할 수 있는 프레임워크를 개발하여 기업의 수익 및 비용 등의 재무 정보를 공개하도록 장려하기 위하여 설립된 협의체로, 4가지 주요 프레임워크에 맞춰 기업이 정보를 공시하도록 하고 있다(TNFD, 2023a). TNFD는 생물다양성과 관련하여 4가지 주요 프레임워크로 ‘거버넌스’, ‘전략’, ‘리스크 및 영향 관리’와 ‘지표 및 목표’를 제시하고 있다(TNFD, 2023a).

4가지 프레임워크에 대해 공시하기 위한 방안으로는 자연에 대한 의존, 영향, 리스크, 기회를 평가하기 위하여 주로 LEAP 접근법을 사용한다(TNFD, 2023c). LEAP 접근법은 기업의 활동과 접점이 있는 자연자본을 파악하는 “Locate”, 자연에 대한 의존도 및 영향을 파악하는 “Evaluate”, 기업이 자연을 다루면서 발생하는 리스크와 기회를 파악하는 “Assess”, 그리고 앞서 파악된 의존, 영향, 리스크, 기회를 바탕으로 목표에 따라 대응하고 준비하는 “Prepare”로 구성되어 있다(TNFD, 2023c). LEAP 접근법은 기존의 일방향적 자원 이용 패러다임을 넘어, 자연과 경제 시스템 간의 복잡한 상호작용을 체계적으로 분석하는 접근 방식이다. 이는 시스템 사고(System Thinking)의 핵심 원리와 본질적 유사성을 지닌다. 시스템 사고는 개별 요소들 간의 단순한 인과관계를 넘어 시스템 전체의 순환구조와 피드백 메커니즘을 통해 동태적 상호작용을 이해하고, 근본적 문제 해결을 위한 전략적 개입점을 도출하는 방법론이다(문태훈, 2012). 이런 구조적 유사성은 자연자본을 단순한 투입 요소가 아닌 경제-사회-생태 시스템의 구성 요소로 인식하고, 상호 의존적 관계 속에서 지속가능한 균형을 모색하려는 패러다임적 전환을 반영한다.

이런 시스템적 사고방식은 조경 분야에서도 활용되고 있다. 특히 도시공원은 도시 내 자연 기반 자산(Nature-based Asset)의 대표적인 형태로, 생물다양성 보전과 생태계 서비스 제공에 핵심적인 역할을 하는 공간이다. 도시공원은 시간의 흐름에 따라 지속적으로 물리적, 생태적, 사회적 요소가 변화하는 복합적이고 동태적인 시스템으로, 단순한 공간 보존이 아닌 생태계 기능의 지속가능성을 유지할 수 있도록 시스템 사고 분석에 기반한 연구

가 선행되고 있다(이현지 등, 2015; 김도윤 등, 2023). 따라서 TNFD의 LEAP 접근법을 활용하여 도시공원 유지관리의 전략을 체계적으로 평가·공시할 필요성이 제기되고 있다. 이는 “거버넌스, 전략, 리스크 관리, 지표 및 목표”라는 TNFD의 4대 공시 항목을 조경 분야에 적용하는 데 기여할 수 있으며, 장기적으로는 조경 분야의 역할 확대와 지속가능한 공원 관리 정책 수립에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 월드컵공원을 대상으로 시스템 사고 방법론과 TNFD의 LEAP 접근법을 통합한 새로운 분석틀을 개발하여, 도시공원 유지관리 활동이 생물다양성에 미치는 복합적 영향을 체계적으로 평가하고 지속가능한 관리 전략을 도출하는 것을 목적으로 한다. 구체적인 세부 목표는 다음과 같다. 첫째, 월드컵공원의 유지관리 활동(외래종 관리, 해충 방제, 전정 관리, 시비 관리)과 생물다양성 간의 인과관계 구조를 인과순환지도를 통해 분석한다. 둘째, LEAP 접근법을 적용하여 위험·기회 요소를 체계적으로 식별하고 우선순위를 도출한다. 셋째, 파나키(Panarchy) 이론의 리볼트(revolt)와 리멤버(remember) 개념을 적용하여 단기적 개입과 장기적 생태적 안정화를 고려한 적응적 관리 전략을 수립한다. 넷째, 공공부문에서 활용 가능한 TNFD 프레임워크 적용 모델을 제시한다. 이를 통해 TNFD 프레임워크, 시스템 사고, 파나키 이론을 통합한 도시공원 관리의 새로운 패러다임을 제시함으로써 생물다양성 보전과 자연자본 기반 관리를 체계화할 수 있는 실질적 기반을 마련하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 시스템 사고

시스템 사고(system thinking)는 복잡한 문제를 개별 요소들의 집합이 아닌 전체적이고 통합적인 관점에서 이해하고 분석하는 사고방식이다. 이는 시간의 흐름을 고려하여 시스템의 행태 변화(dynamic behavior)를 파악하는 방법론으로(김도훈 등, 1999; 최남희, 2003), 전통적인 선형적 사고와 달리 순환적이고 상호 연결된 관계에 주목한다. 시스템 사고는 변수들 간의 단순한 인과관계 분석을 넘어 시스템의 복잡한 순환구조와 피드백 메커니즘을 이해함으로써, 문제의 근본 원인을 파악하고 지속가능한 해결방안을 위한 전략적 개입점(leverage point)을 도출할 수 있다는 장점이 있다(추병주와 정운수, 2006; 장의선, 2007; 문태훈, 2012; 한동균과 조의호, 2015).

시스템 사고의 핵심 도구인 인과순환지도(causal loop diagram)는 시간의 흐름에 따라 변화하는 인과관계와 피드백 루프를 시각적으로 도식화하여, 다양한 변수 간의 복합적 관계를 체계적으로 분석하고 문제 해결을 위한 전략을 도출할 수 있도록 한다(김동환, 2004). 인과순환지도는 강화 루프(reinforcing loop)와 균형 루프(balancing loop)로 구분되며, 강화 루프는 시스템의 변화를 가속화하는 자기강화 과정을, 균형 루프는 목표 지향적 행동을 통해 시스템의 안정성을 유지하는 과정을 나타낸다(Senge, 1990).

조경 분야는 자연 생태계와 인간 사회가 복합적으로 상호작용하는 사회-생태시스템(social-ecological system)을 다루기 때문에, 시스템 사고 접근법이 특히 유용하다. 조경 공간은 생물리적 환경, 생태적 과정, 인간 활동, 사회적 요구가 다층적으로 연결되어 있으며, 이들 간의 동태적 상호작용을 통해 지속적으로 변화하는 특성을 갖는다. 따라서 개별 요소에 대한 단편적 접근보다는 전체 시스템의 구조와 행태를 이해하는 통합적 접근이 필요하다. 이에 따라 조경분야에서는 지속가능한 유지관리 방안을 도출하기 위해 시스템 사고를 활용한 연구가 선행되고 있다. 예를 들어, 밤섬 생태관광자원과 유해환경과의 관계를 분석하고 소음, 빛공해, 생태계교란 생물 관리 방안 등에 대해 도출한 연구(최윤의 등, 2014), 안티생태공원의 비점오염물질 유입에 따른 생태저류지를 분석하여 수생태계 관리 방안을 도출한 연구(이현지 등, 2015), 베트남의 맹그로브 숲의 생태계서비스를 분석하고 회복력 있는 해안 자원 관리 방안을 제시한 연구(태미경 등, 2024)가 있다. 또한 민간공원 특례사업에 따른 도시공원의 생태계 서비스에 대한 영향을 분석하고 공원 관리 전략을 제시한 연구도 있다(김도윤 등, 2023). 그러나 이러한 연구들은 주로 사회생태시스템 내 구성 요소 간의 상호작용을 중심으로 관리방안을 도출하고 있으며, 실제 현장에서 시행되고 있는 유지관리 활동의 구조를 시스템적으로 분석하고 지속가능한 유지관리로의 전환을 위한 구체적 전략까지 제시한 연구는 미비한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 시스템 사고를 기반으로 도시공원의 유지관리 활동이 생물다양성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2.2 TNFD

전세계적으로 자연환경의 급속한 악화와 생물다양성의 감소가 심각한 사회경제적 위기를 초래하고 있다. 수분 매개자의 감소와 토양 생물의 감소는 농업 생산성을 저하시키고 기후변화나 병해충에 대한 리질리언스를 약화시키며, 생물 자원을 활용하는 제약 및 바이오 산업이나 생태관광 분야에도 직접적인 영향을 미치고 있다. 또한 생물다

양성의 감소로 인한 산림 및 해양 생태계의 붕괴는 산사태, 홍수 등의 자연재해 대응력을 약화시키며, 궁극적으로 인간의 삶을 위협하는 요소가 된다. 이런 자연자본 위기는 기업의 경영 환경에도 직접적인 영향을 미치고 있다. 기업들은 자연과 관련된 리스크를 적절히 관리하지 못하여 소송에 직면하거나 신용 등급과 시장 가치가 하락하는 문제를 겪고 있다. 특히 공급망 중단, 원자재 가격 상승, 규제 리스크 증가 등이 기업의 재무성과에 직접적인 타격을 주고 있다. 그러나 대부분의 기업과 금융기관, 산업시장은 자연자본 리스크에 대한 대비가 부족한 실정이다. 이러한 위기에 대응하기 위해 전세계적으로 다양한 정책과 이니셔티브가 진행되었으며, 2021년에는 'the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures'(이하 TNFD)가 등장하였다. TNFD는 자연자본과 관련된 리스크를 체계적으로 평가하고 관리할 수 있도록 기업의 재무 및 비재무 정보를 공시하도록 장려하는 국제적 프레임워크이다(TNFD, 2023a).

TNFD는 2020년 9월부터 2021년 6월까지 49개의 금융기관 및 기업, 8개의 정부 기관, 18개의 연구 기관으로 구성된 비공식 작업 그룹을 통해서 준비 단계를 선행하였다. 준비단계에서 확립된 '시장 활용성 보장', '과학적 접근 방식', '기업 및 금융 전반에 걸친 자연에 대한 영향, 의존, 위험, 기회 인식', '목적지향적으로 행동', '기업 및 금융에 적용이 가능한 통합적인 위기 관리 프로세스 설계', '자연기반해법의 중요성 반영' 그리고 '가치 있고, 저렴하고, 접근가능한 프레임워크와 접근 방식 제공'이라는 7가지의 원칙을 통해 프레임워크를 구축하였다(TNFD, 2023a). 이러한 원칙을 기반으로 TNFD는 '거버넌스', '전략', '위기 및 영향 관리', '지표 및 목표' 이렇게 4가지의 핵심영역을 설정하여 공시 프레임워크를 구성하였다. '거버넌스'는 자연과 관련된 영향, 의존, 위험, 기회에 대한 조직의 지배구조를 공개하는 것을 의미한다. '전략'에서는 자연과 관련된 영향, 의존, 위험, 기회가 비즈니스 모델, 재무 계획에 미치는 영향이 중요한 경우 이에 대한 정보를 공개해야 한다는 내용이다. '위기 및 영향 관리'는 자연과 관련된 영향, 의존, 위험, 기회를 식별, 평가, 우선 순위 지정 및 모니터링을 하기 위해서 사용하는 프로세스를 공개해야 한다는 내용이다. 마지막으로 '지표 및 목표'는 자연과 관련된 영향, 의존, 위험, 기회를 평가하고 관리하는데 사용되는 지표와 목표를 공개하는 것을 의미한다(TNFD, 2023b). 이와 같은 TNFD 공시 프레임워크는 기업이 자연 관련 위험을 평가하고 기후 관련 위험 보고를 통합하는 것에 기여할 수 있다. 특히 규제 기관이 새로운 규제 및 기준을 만들 때 TNFD 공시 프레임워크가 이용될 수 있으며 증권거래소가 상장 요건에 자연 관련 기회를 반영하는 것을 고려하는데 활용할 가능성도 있다. 이 외에도 보험 및 회계회사, 데이터 제공자, 신용평가기관, 금융기관 및 투자자들 또한 TNFD 공시 프레임워크를 이용할 수 있다(TNFD, 2023a). 따라서 향후 TNFD 공시 프레임워크는 기업의 지속가능성을 평가하는 중요한 도구로서 더욱 확대될 것으로 예상된다.

실제, TNFD는 현재 500여 개의 조직이 참여하고 있으며 17조 7000억 달러 규모의 운용자산이 TNFD 공시 프레임워크에 부합하여 운영되고 있을 뿐만 아니라(TNFD, 2024), IT기업, 부동산기업, 금융기업, 보험사 등 다양한 분야에서 TNFD에 참여하여 각 기업활동이 자연자본에 어떠한 영향을 미치고 있는지에 대해 보고서를 작성하고 있다. 이처럼 TNFD 공시 프레임워크는 기업이 자연자본과의 상호작용을 평가하고, 지속가능성을 고려한 경영 전략을 수립하는 데 있어 중요한 기준으로 사용될 예정이며, 환경적·사회적·경제적 지속가능성을 고려하는 기업 경영의 필수 요소로 자리잡아 기업의 활동을 변화시킬 것이라고 예상된다(Deweerd et al., 2022).

2.2.1 TNFD의 LEAP 접근법

TNFD는 자연자본에 대한 상호작용을 평가하기 위하여 LEAP 접근법(Locate, Evaluate, Assess, Prepare approach)을 핵심 방법론으로 활용한다. LEAP 접근법은 기업이 자연자본과 상호작용하는 방식을 단계적으로 평가하는 방법론으로, 자연에 대한 의존, 영향, 위험 기회를 평가한다. TNFD는 이러한 LEAP접근법을 통해 평가한 내용을 토대로 '거버넌스', '전략', '위기 및 영향 관리', '지표 및 목표'로 구성된 주요 프레임워크와 연계하여 기업의 자연자본과 관련된 활동을 보다 효과적으로 공개할 수 있도록 지원한다(TNFD, 2023a). 이는 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)에 근거를 두고 있으며, 국제 지속가능 공시기준위원회(ISSB)의 기준과도 부합하여 기업이 자연자본과 생물다양성을 보다 체계적으로 관리할 수 있도록 기여할 것으로 기대된다(조도순, 2024). LEAP 접근법은 그림 1과 같이 Locate(자연과의 접점 분석), Evaluate(의존도 및 영향 평가), Assess(중요한 위험 및 기회 평가), Prepare(대응 및 공시) 네 가지 단계로 구성되어 있다(TNFD, 2023b).

먼저, Locate에서는 기업이 자연자본과 연결되는 사업 운영의 영향을 평가한다. 이를 위해 사업 풋프린트, 자연과의 관계, 우선 지역 식별, 섹터 식별을 수행하며, 기업이 환경적 영향을 고려해야 할 주요 영역을 파악하는 과정이 포함된다. 이 단계는 시스템 사고에서 문제를 인식하고 시스템 범위 설정 및 변수 도출의 단계와 유사하다. 두 번째 단계인 Evaluate에서는 기업 활동이 자연자본 및 생태계 서비스에 미치는 영향을 분석한다. 여기에는 자연자본 및 생태계서비스 식별, 의존도 및 영향 분석 및 식별이 포함되며, 기업이 자연환경에 얼마나 의존하는지, 그리고

기업 활동이 생태계에 미치는 영향을 구체적으로 평가할 수 있도록 한다. 이는 시스템 사고에서 주요 변수 간의 인과관계를 분석하고, 피드백 루프와 같은 시스템 구조를 도출하여 시스템의 행태를 이해하는 과정과 대응된다. 세 번째 단계인 Assess에서는 앞선 평가를 바탕으로 기업이 직면한 위험 요소와 기회를 분석한다. 이 과정에서는 위험 및 기회 식별, 기존 위험관리 및 기회 창출, 추가 위험관리 및 기회 창출, 위험 및 기회의 중요성 평가가 수행되며, 기업이 환경적 리스크를 줄이고 지속가능한 성장 기회를 모색할 수 있도록 지원한다. 이는 시스템 사고에서 도출된 피드백 구조를 바탕으로 시스템의 동태성을 예측하고, 문제 발생의 구조적 원인을 진단하며 전략 지점을 도출하는 과정으로 분석될 수 있다. 마지막 단계인 Prepare에서는 기업이 자연자본과의 관계를 관리하기 위한 구체적인 전략을 수립하고, 이를 공시하는 절차를 포함한다. 여기에는 전략과 자본 배분, 성과 측정, 보고서 작성, 공시가 포함되며, 기업이 지속가능한 경영 목표를 설정하고 환경적 책임을 투명하게 공개할 수 있도록 하는 단계로 해결방안 및 전략을 도출하는 단계이다.

현재 TNFD의 LEAP 접근법과 관련된 연구는 주로 조정 및 환경생태 분야에서의 적용 가능성 탐색에 초점을 맞추고 있다. 예를 들어, LEAP 접근법의 적용을 위해 필요한 데이터 및 분석 방법을 탐색하는 연구(김은섭 등, 2024; 박현심과 구분학, 2025), 산업별로 생태계서비스에 대한 의존도를 분석하여 LEAP 접근법의 적용 방향성을 제시하는 연구(이나겸 등, 2025), 환경영향평가와 TNFD의 연계 방향성을 제시하는 연구(최선미와 구분학, 2025)가 진행되고 있다. 즉, 기존 국내 연구에서는 LEAP 접근법의 개념적 정립과 조정 및 환경생태계 부문에서 TNFD의 활용 필요성을 강조하고 있지만, 실질적으로 LEAP 접근법을 활용하여 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 LEAP 접근법을 도시공원의 유지관리 활동에 적용하기 위해, 각 단계의 개념을 시스템 사고 관점에서 재해석하고, 도시공원 관리 요소와의 연계를 구체적으로 제시하고자 한다. 이러한 분석들은 조정 및 환경생태계 분야에서 TNFD를 활용할 수 있는 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

2.3 Panarchy 이론

파나키(Panarchy) 이론은 생태학자 C.S. Holling(1973)이 처음 제시한 개념으로, 생태계의 회복력(resilience)과 적응주기(adaptive cycle) 개념에서 출발하여 Holling and Gunderson(2002)에 의해 체계적으로 발전된 이론이다. 이 이론은 전통적인 평형 생태학의 한계를 극복하고, 복잡한 사회-생태시스템(social-ecological system)의 동태적 변화와 다중 스케일 상호작용을 설명하기 위해 개발되었다. Panarchy라는 용어 자체는 그리스 신화의 목신 Pan(자연의 힘과 예측 불가능성을 상징)과 hierarchy(계층적 구조)를 결합한 것으로, 자연과 인간 시스템의 복잡하고 비선형적인 상호작용을 표현한다(Allen et al., 2014; Garmestani et al., 2020). 파나키 이론은 리질리언스(resilience) 이론과 계층 이론(hierarchy theory)의 통합에서 파생된 개념으로, 인간과 자연의 복잡한 체계가 다양한 공간적·시간적 스케일에서 나타나는 적응주기들의 상호작용을 설명한다. 이 이론의 핵심은 시스템이 고정된 평형 상태를 유지하는 것이 아니라, 지속적인 변화와 적응을 통해 회복력을 확보한다는 점이다. 특히 다중 스케일에서 동시에 일어나는 변화들이 어떻게 상호작용하여 전체 시스템의 안정성과 변화를 동시에 가능하게 하는지를 설명한다.

파나키 이론의 기본 단위인 적응주기는 성장(growth, r), 보존(conservation, K), 해체(collapse/release, Ω), 재조직(reorganization, α)의 네 단계로 구성된다. 이 4단계는 순환적으로 반복되면서 시스템의 지속적인 적응과 진화를

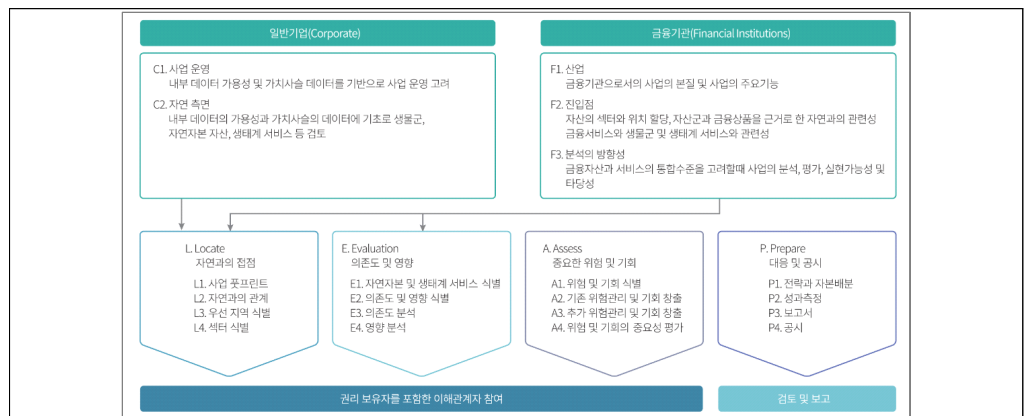


그림 1. LEAP 접근법
출처: TNFD, 2023c; 여밀림, 2023 재인용

가능하게 한다. 파나키 이론의 핵심적 특징 중 하나는 다양한 공간적·시간적 스케일의 적응주기들이 독립적으로 작동하는 것이 아니라 계층적 구조 속에서 상호작용한다는 점이다. 이런 다중 스케일 상호작용은 그림 2와 같이 리볼트(revolt)와 리멤버(remember)라는 두 가지 주요 메커니즘을 통해 나타난다.

리볼트는 작고 빠른 스케일의 급격한 변화가 크고 느린 스케일의 시스템에 영향을 미쳐 변화를 촉발하는 상향식(bottom-up) 과정이다. 일반적으로 작은 스케일의 해체(Ω) 단계가 큰 스케일의 보존(K) 단계에 충격을 가하여 전체 시스템의 구조적 변화를 유도한다. 도시공원의 맥락에서는 특정 구역의 생태계 교란이 전체 공원의 관리 방식 변화로 이어지거나, 국지적 환경 문제가 광역적 정책 변화를 촉발하는 경우가 이에 해당한다. 이는 각각의 유지관리 조치가 전체 월드킵공원의 생태시스템에 영향을 미칠 수 있음을 나타낸다. 이와 반대로 리멤버는 크고 느린 스케일의 안정된 시스템이 작고 빠른 스케일의 재조직 과정에 영향을 미쳐 시스템의 기억과 유산을 전달하는 하향식(top-down) 과정이다. 일반적으로 큰 스케일의 보존(K) 단계가 작은 스케일의 재조직(α) 단계에 구조와 기능의 틀을 제공한다. 도시공원에서는 전체 공원의 기본 설계 철학이나 생태적 기반이 국지적 복원이나 개선 사업의 방향을 안내하는 경우가 이에 해당한다. 예를 들어, 공원 전체의 생태적 목표와 원칙이 특정 구역의 복원 방식을 결정하거나, 기존의 관리 경험과 노하우가 새로운 문제 상황에 대한 해결책을 제공하는 것이다(Gotts, 2007).

이러한 파나키 이론은 생태계와 같은 복잡한 시스템을 이해하기 위하여 다양한 선행연구에서 활용되고 있다(Allen et al., 2014). 특히 전통적인 명령-통제식 관리 방식의 한계를 극복하고 적응적 관리(adaptive management) 체계를 구축하는 데 유용한 개념적 틀을 제공하고 있다. 예를 들어, 공원의 리질리언스 확보를 위하여 공원을 적응주기와 다중 스케일의 상호작용으로 구성된 복합 사회생태시스템으로 보고, Panarchy 개념을 적용하여 관리 전략에 대해 제시한 연구가 있다(이지현, 2014). 또한 파나키 이론을 바탕으로 환경 파괴가 심화되고 있는 지역을 대상으로 사회, 생태적 역학을 분석한 연구(Nacher et al., 2021), 도시의 회복력을 높이기 위한 전략을 도출하기 위하여 파나키 이론 기반의 분석을 진행한 연구(Xinghua et al., 2025), 도시공원을 대상으로 파나키 이론을 활용하여 공원의 변화에 따른 관리 전략을 도출한 연구가 있다(Carreiro and Zipperer, 2011). 이처럼 파나키 이론은 도시공원과 같은 복합적 사회-생태시스템의 이해와 관리에 여러 가지 중요한 통찰을 제공한다. 첫째, 도시공원을 정적인 시설물이 아닌 지속적으로 변화하고 적응하는 동태적 시스템으로 인식하게 한다. 둘째, 다양한 스케일(개별 식물-군락-생태계-공원 전체-도시 전체)에서 동시에 일어나는 변화들 간의 상호작용을 체계적으로 분석할 수 있는 틀을 제공한다. 셋째, 위기나 교란을 단순한 부정적 요소가 아닌 시스템 혁신과 적응의 기회로 인식하게 한다. 넷째, 단기적 효율성과 장기적 회복력 간의 균형을 고려한 관리 전략 수립을 가능하게 한다.

본 연구에서는 도시공원의 지속가능한 유지관리를 위하여 파나키 이론을 TNFD의 LEAP 접근법 및 시스템 사고와 통합적으로 활용하고자 한다. 구체적으로는 월드킵공원의 다양한 유지관리 활동(외래종 관리, 해충 방제, 전정 관리, 시비 관리)을 서로 다른 스케일의 적응주기로 개념화하고, 각 활동이 어떻게 상호작용하여 전체 공원 시스템의 변화를 이끄는지를 분석할 계획이다. 특히 리볼트와 리멤버 개념을 적용하여 단기적 개입이 장기적 생태계 변화로 확산되는 과정과, 기존의 생태적 기반이 새로운 관리 방안의 정착을 지원하는 과정을 구체적으로 분석하고자 한다.

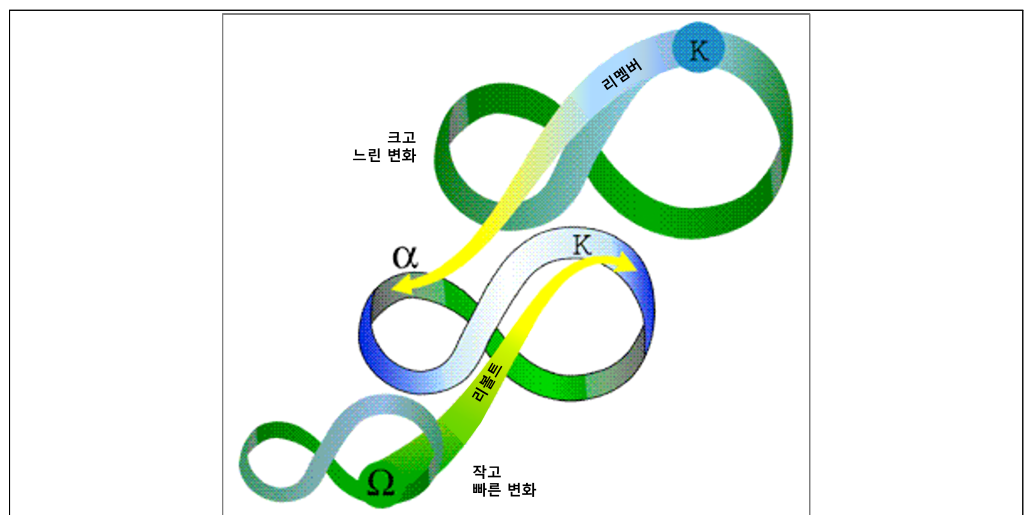


그림 2. 파나키의 적응 순환
출처: <https://www.resalliance.org/>

다. 이를 통해 즉각적인 문제 해결(리볼트)과 장기적 생태 안정성 확보(리폼비)를 동시에 고려한 적응적 유지관리 전략을 수립할 수 있을 것으로 기대된다. 이런 접근은 기존의 개별 관리 기법 중심의 접근을 넘어서 유지관리 활동들 간의 다중 스케일 상호작용을 고려한 통합적 관리 체계를 구축하는 데 기여할 수 있으며, 도시공원의 생태적 건강성과 회복력을 동시에 증진시키는 실천적 관리 방안을 제시할 수 있을 것이다.

3. 연구방법

3.1 연구 범위

본 연구에서는 도시공원의 유지관리 행위가 생물다양성에 미치는 영향을 파악하기 위해 서울시 공원 중 월드컵공원을 대상으로 분석하였다. 서울시 청소사업본부는 1978년 3월부터 1993년까지 15년간 매립된 쓰레기에서 발생하는 침출수가 토양 및 지하수를 오염시키거나 쓰레기에서 발생한 매립가스로 인해 대기가 오염되는 등의 각종 환경문제를 발생시키자, 대규모의 쓰레기를 처리하고 매립지 내부로의 빗물이 스며드는 것을 방지하고 사면의 경사 안정화 등을 위한 방안으로 난지도에 매립지를 조성하고 상부에 월드컵공원을 조성하는 방안을 세웠다. 이에 따라 월드컵공원은 270만²의 면적으로 2002년에 조성되었으며 하늘공원, 노을공원, 난지천공원, 난지한강공원, 평화의공원으로 나누어져 있다(<https://trf.seoul.go.kr/content/acwad144.do>; <https://parks.seoul.go.kr/parks/detailView.do?pldx=6>). 월드컵공원은 쓰레기 매립지 위에 생태 공간을 조성하기 위하여 생태습지 및 생태하천 조성, 생명의 나무 1,000만 그루 심기와 자생 초종 등의 생태 복원 방안을 이용하여 초지 조성 후 생태적 천이 유도 등의 과정을 거쳐서 자연의 생태적인 회복을 통한 생태적 안정성을 만들어갈 수 있도록 유도하였다. 이에 따라 과거에는 관찰되지 않았던 고사리 등의 양치식물과 야고(*Aeginetia indica*), 지네발새(*Dactyloctenium aegyptium*) 등의 국내에서 희귀하거나 미기록된 식물들이 출현하기도 하였다. 실제 월드컵공원의 생태계 모니터링 결과 200년 조성 전 559종의 동식물이 2016년 1,557종으로 증가하며 생물다양성이 매우 우수한 지역으로써 도시의 주요 문제인 쓰레기 문제를 해결하고 오염지를 생태 복원한 사례지로 주목받고 있다(손병도와 이경재, 2004; <https://www.aurum.re.kr/Research/PostView.aspx?mm=1&ss=1&pid=10355>). 그러나 최근, 월드컵공원에서는 사면지구의 아까시나무, 단풍잎돼지풀 등의 외래종에 의한 자생식생 교란 위협의 이유로 외래종의 번식이 심각한 문제로 대두되고 있다(한봉호 등, 2023). 큰김의털, 가는보리풀 등의 외래초본류로 인하여 피복되어 있는 상태로 자생초본류로의 천이를 기대하기 어려우며(손병도와 이경재, 2004), 목본류에서는 외래수목인 아까시나무의 군집 증가로 자생종인 버드나무와 능수버들의 군집이 감소하고 있다. 이에 서울시에서는 매년 월드컵공원의 생태계교란종을 모니터링하고 있으나 전문인력이 아닌 사무소 직원 및 시민단체가 외래종 제거 업무를 담당하고 있기에 외래종 제거가 효과적으로 이루어지지 않는 문제가 있다. 또한 소나무사들음병(재선충병)으로 인하여 병해충 방제 사업을 진행하고 있으나 고독성의 살충제의 사용으로 장기적인 측면에서의 생물 다양성에 대한 영향이 우려되고 있는 실정이다. 즉, 월드컵공원은 과거 쓰레기 매립지였던 환경 생태적 문제지를 생태 복원을 통해 생물 다양성을 증진시키고자 하였지만 유지관리과정에서 생물다양성에 관련하여 부정적인 영향을 미치고 있어, 공원의 유지관리와 생물다양성 간의 상호작용에 대해 정확하게 분석할 필요성이 있다. 이에 따라 공원의 생물다양성이 저하되고 있을 우려가 되는 지역으로 본 연구에서는 월드컵공원을 대상지로 선정하였다. 월드컵공원의 유지관리에 대한 내용적 범위는 공원의 유지관리 항목 중, 공원의 지속가능한 생태계 유지를 위하여 매년 공원의 유지관리 활동에 대하여 명시한 외래종, 해충, 전정, 방제 보고서 기준을 기준으로 한정하였다.

따라서 본 연구에서는 시스템 사고를 활용한 LEAP접근법을 기반으로 월드컵공원의 유지관리 활동이 생물다양성에 미치는 영향을 평가하고 지속가능한 도시 공원 조성 및 관리를 위한 전략을 제시하고자 한다.

3.2 연구 방법

본 연구는 월드컵공원의 유지관리 활동이 생물다양성과 회복력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 LEAP접근법의 분석 프레임, 시스템 사고의 인과순환지도, 파나키 이론을 연계하여 경제-사회-생태 시스템을 통합적으로 해석하고자 하였다. 즉, 인과순환지도는 LEAP 각 단계를 구조화하는 분석 도구로, 파나키 이론은 Prepare 단계에서 회복력 전략으로 활용하여, 경제-사회-생태 시스템의 구조적 인과관계를 통합적으로 분석하고 전략적 대응 방안을 설계할 수 있는 통합적 방법론을 제시하고자 한다.

인과순환지도는 시스템 사고를 도식화할 수 있는 방법론으로 문제에 대한 정의와 시스템의 경계 설정 후 주요 변수들을 도출하여 도식화하는 과정으로 이루어진다. 변수 간의 인과관계는 화살표(→)로 나타내며, 동일 방향으로

변화하면 (+)부호, 반대 방향으로 변화하면 (-)부호로 표시하고 시간 지연은 (=)로 나타낸다. 이때, 인과관계가 순환구조를 이루면 피드백 루프(feedback loop)라고 하는데, 시스템이 지속적으로 증가하거나 감소하면 강화루프, 일정한 목표치로 안정화되면 균형루프라 한다(김도훈 등, 1999; 정재운과 김현수, 2007). 시스템 사고는 총 3단계로 진행된다. 첫째, 시스템의 범위 설정 및 시스템 내 주요 변수를 도출한다. 둘째, 도출된 주요 변수들 간의 인과관계를 바탕으로 인과순환구조를 분석한다. 셋째, 앞서 도출된 인과순환지도를 통합하여 전략 지점을 도출하고 해결방안을 제시한다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 LEAP 접근법으로 재해석하여 그림 3과 같이 진행하였다. 먼저 'Locate'의 경우 인과순환지도 속 자연자본과 관련된 변수들을 통해서 평가하였다. 관련 변수는 조경업체 홈페이지, 조경 관리 관련 문서 등을 통해 자료를 수집하여 인과순환지도의 주요 변수를 도출하였다. 'Evaluate'의 경우, 앞서 도출된 변수들을 바탕으로 각 유지관리 별 인과관계를 분석하여 인과순환지도를 작성하였다. 인과순환지도를 통해 강화루프와 균형루프를 도출하여 피드백 구조를 도출하여 유지관리 방식이 생태계에 미치는 영향을 분석하였다. 'Assess' 단계에서는 Evaluate에서 도출된 개별 인과순환지도를 통합하여 균형 루프 혹은 자연에 대한 긍정적인 방향으로의 강화루프 내 변수는 자연에 대한 기회 요소로, 부정적인 방향으로의 강화루프 내 변수는 위협 요소로 보아 위험과 기회에 대한 전략 변수를 도출하였다. 마지막으로 'Prepare' 단계에서는 인과순환지도를 통해서 도출해 낸 전략 지점을 바탕으로 파나키 이론의 리볼트, 리멤버 개념을 적용하여, 단기적 위기 대응과 장기적 생태 안정화 전략을 제시하였다. 이를 통해 지속가능한 도시공원 조성 및 관리 방법을 제안하고자 하였다. 인과순환지도 작성은 벤심 소프트웨어(Vensim PLE 9.3.5 Software)를 활용했다(박정수, 2021). 벤심은 Ventana Systems에서 개발한 모델로 1990년부터 공개적으로 사용할 수 있도록 개방되어(https://vensim.com/), 잠재원인들의 상호작용 구조를 분석 및 시각화하여 전체적인 시스템의 영향관계를 파악할 수 있는 소프트웨어로서 활발히 사용되어왔다(유미진과 함은미, 2019). 본 논문에서도 이러한 특성을 바탕으로 시스템 측면에서 도시공원 유지관리 활동을 구조적으로 분석하고자 벤심을 활용하였다.

4. 연구결과

4.1 Locate

본 논문에서는 '서울시 공원녹지분야 품셈적용 지침(2023)'의 유지관리 항목 중 선행연구 및 월드킵공원 유지관리 보고서에 대한 이론적 고찰을 바탕으로 자연자본에 영향을 미치는 요인들을 도출하였다(표 1 참조). 먼저, 외래종 관리에 대한 변수로는 월드킵공원에서 생태계 교란 생물 관리 방안으로 사용하고 있는 직접 제거량이 변수로 도출되었다(서부공원여가센터, 2024). 이와 관련하여 외래종 직접 제거로 관리하였을 때, 외래초본, 외래목본, 자생초본, 자생목본 간의 인과관계에서 차양된 면적으로 인하여 발생하는 상호작용(Wang et al., 2021)과 관리 과정과 관련된 자생수목 재식재율, 임목 폐기물 발생량이 도출되었다. 이에 대한 생물 다양성과 연관되는 지표로는 온실가스 배출량, 폐기물 발생량 & 폐기량, 외래종 유입에 대한 대책, 생태계 상태가 도출되었다. 다음으로 해충 방제 관리에서는 살충제 살포로 관리하였을 때, 살충제에 따른 저항성 해충 개체수와 해충 개체수, 수분 매개자 개체수에 대하여 생태계를 분석할 수 있으며(권덕호, 2021; Taniguchi et al., 2012), 관리 과정과 관련된 변수로는 월드킵공원 병해충방제 작업계획서에 따라 방제 차량 운행량, 토양 오염도가 도출되었다(서부공원여가센터, 2024). 이와 관

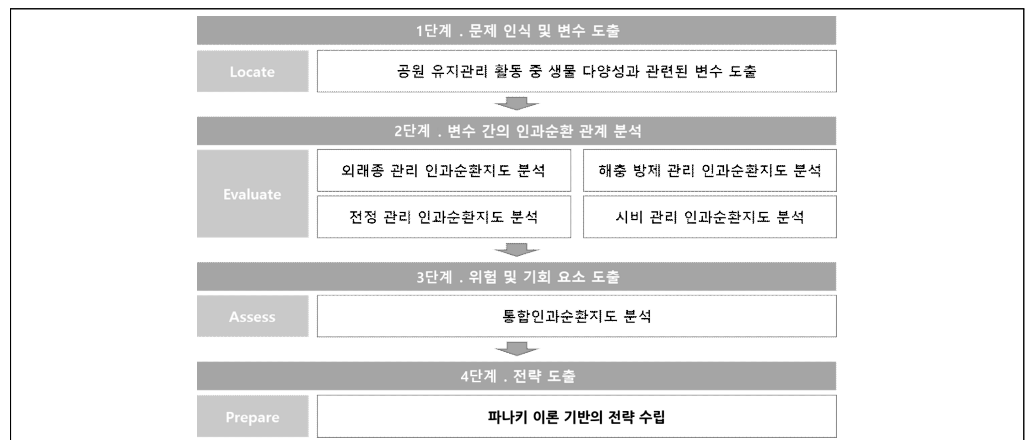


그림 3. 연구 흐름도

표 1. 월드컵공원의 유지관리 관련 주요 변수 도출 결과

유지관리 구분	주요 변수	생물 다양성 연관 지표
외래종 관리	외래종 직접 제거량 외래초본 외래목본 자생초본 자생목본 차양된 면적 자생수목 재식재율 임목 폐기물 발생량	온실가스 배출량 폐기물 발생량&폐기량 외래종 유입에 대한 대책 생태계 상태
해충 방제 관리	살충제 살포량 살충제 저항성 해충 개체수 해충 개체수 방제 처방 이행량 수분 매개자 개체수 토양 오염도	온실가스 배출량 토양으로 방출된 오염 물질 종류 중 멸종 위험
전정 관리	전지전정 관리량 약전정 대비 과전정 비율 맹아지 자극 정도 동지를 틀 수 있는 가지 또는 옹이 수 식물체의 내성 정도 임목 폐기물 처리량 전지전정 기계 사용량	온실가스 배출량 폐기물 발생량&폐기량 생태계 상태
시비관리	유기비료 사용량 토양 영양분 식물체의 내성 정도	온실가스 배출량 토양으로 방출된 오염 물질 종류 생태계 상태

련된 생물 다양성과 연관되는 지표로는 온실가스 배출량, 토양으로 방출된 오염 물질 종류, 중 멸종 위험이 도출되었다. 전정 관리에서는 약전정 대비 과전정하는 비율, 맹아지 자극 정도, 식물체의 내성 정도가 도출되었고(최성태 등, 2006), 전정 관리 과정에서 사람이 시행하는 행위에 대하여 임목 폐기물 처리량, 전지전정 기계 사용량이 도출되었다. 이에 대한 생물 다양성과 연관되는 지표로는 온실가스 배출량, 폐기물 발생량 & 폐기량, 생태계 상태가 도출되었다. 시비관리에서는 유기비료 사용량에 대한 변수가 도출되었고 이에 대한 변화로 토양 영양분, 식물체의 내성 정도가 도출되었다(Zhang et al., 2024). 이와 관련한 생물 다양성과 연관되는 지표로는 온실가스 배출량, 토양으로 방출된 오염 물질 종류, 생태계 상태가 연관된 것으로 나타났다.

4.2 Evaluate

4.2.1 외래종 관리 인과순환지도

월드컵공원의 외래종 관리에 대하여 인과순환지도로 분석한 결과는 그림 4와 같다. 식생 생태계를 외래목본, 외래초본, 자생목본, 자생초본으로 분류하여 분석한 결과, 목본류의 개체수가 증가하면 자생초본과 외래초본이 차양되어(Wang et al., 2021), 목본류의 개체수가 지속적으로 증가할수록 초본의 수는 감소하는 B1, B2 루프가 나타나게 된다. 그러나 자연회복하는 과정에서 외래초본은 생육과 번식 속도가 자생종보다 빠르기 때문에 외래초본의 개체수가 먼저 증가하고 이에 따라 자생초본의 생육 가능 면적이 감소하여(김의주 등, 2018), 장기적으로 자생종의 생육 공간 및 개체수가 지속적으로 감소하는 R1루프를 발생시킨다. 구체적으로는 현재 월드컵공원의 외래종으로 아까시 나무 군락, 가시박, 환삼덩굴, 단풍잎돼지풀 등이 서식하고 있다. 이러한 외래종은 지하경을 뺀 자생수종의 생육을 방해하고 생장 속도가 빨라 다른 식물이 광합성을 하지 못하게 하여 생물종 다양성을 감소시킨다(이인용, 2021). 즉, 자생초본의 지속적인 감소와 외래초본의 확산이라는 생태계 교란 현상을 지속적으로 심화시키는 순환구조를 초래한다.

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 현재 월드컵공원에서는 물리적 제거 관리를 수행하고 있다. 월드컵공원의 생태계 교란을 발생시키는 생물의 관리활동으로는 5~6월에 가시박, 환삼덩굴의 어린 개체를 뿌리채 뽑고 7~9월에

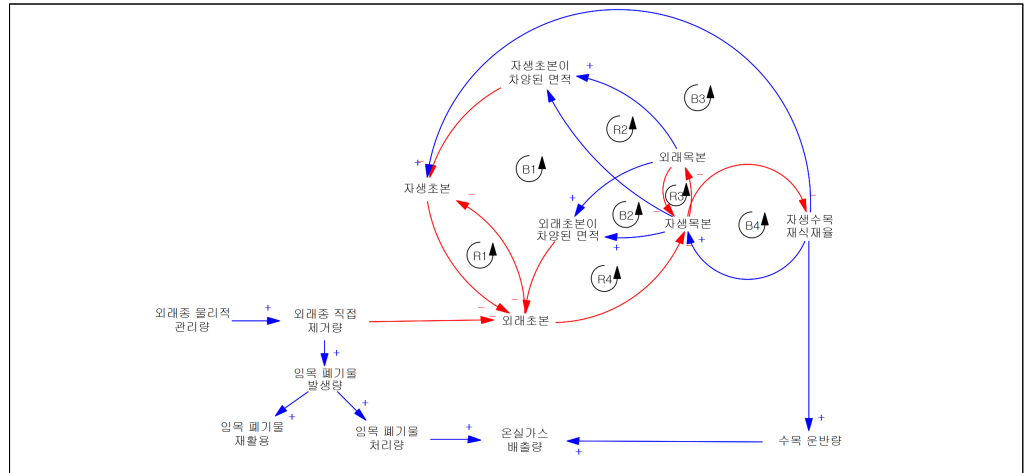


그림 4. 외래종 관리 인과순환지도

단풍잎돼지풀 줄기 및 꽃대 자르기 등의 인력을 사용한 직접 제거하는 방법을 사용하고 있다(서부공원여가센터, 2023). 외래종 제거 후에는 참나무류, 벚나무류 등의 교목과 화살나무, 덩굴나무 등의 관목을 포함한 자생수목의 재식재를 통하여 자생초본과 자생목본의 개체수를 증가시켜 B3, B4루프를 형성시키고, 이는 외래종의 세력을 약화시켜 재발생을 억제시키고 있다(서부공원녹지사업소, 2022).

외래종의 물리적 제거를 통해 발생하게 된 임목 폐기물은 소생물 서식공간과 공원 시설물의 보수자재 등으로 재 활용이 되고 있는 것으로 보고되고 있다(서부공원녹지사업소, 2022). 그러나 지속적으로 폐기물이 발생할 경우, 재활용 가능 수용량을 넘어서 소각하는 임목 폐기물 처리량이 증가할 것으로 나타났으며, 이 과정에서 온실가스 배출량이 발생할 것으로 사료된다. 실제, 2024년 기준 월드컵공원 유지관리에 대한 예산내역 항목에 임목폐기물 처리가 200톤으로 산출되어 유지관리 예산을 운용하고 있는 것으로 확인된다(<https://opengov.seoul.go.kr/budget/30201814>). 이에 따라 생태계를 교란시키는 덩굴성 식물과 돼지풀을 포함한 외래종을 관리하기 위하여 사람의 개입 없이 지속가능한 유지관리가 가능하도록 생물학적 방제가 대두되고 있다. 그러나 생물학적 방제 연구에 따르면 아직 효과적인 생물종을 찾지 못하여 현재까지는 효과가 미약한 것으로 연구되고 있다. 따라서 월드컵공원에서는 외래종을 관리하기 위하여 물리적 방제를 진행하고 있는 것으로 나타났다.

4.2.2 해충 방제 관리 인과순환지도

월드컵공원의 해충 방제 관리에 대하여 인과순환지도로 분석한 결과(그림 5 참조), 현재 월드컵공원의 병해충 방제작업은 2.5톤의 방제제를 활용하여 고압분사기로 방제를 실시하여 해충을 제거하면서 해충의 개체수를 조절하는 B5루프가 나타났다. 그러나 살충제 살포량이 증가할수록 살충제에 저항성을 가진 해충의 개체수가 증가하게 된다(권덕호, 2021). 이로 인하여 살충제로 해충을 제거하는 효과가 점차 감소하며 피해 규모는 더욱 커지는 R5루프

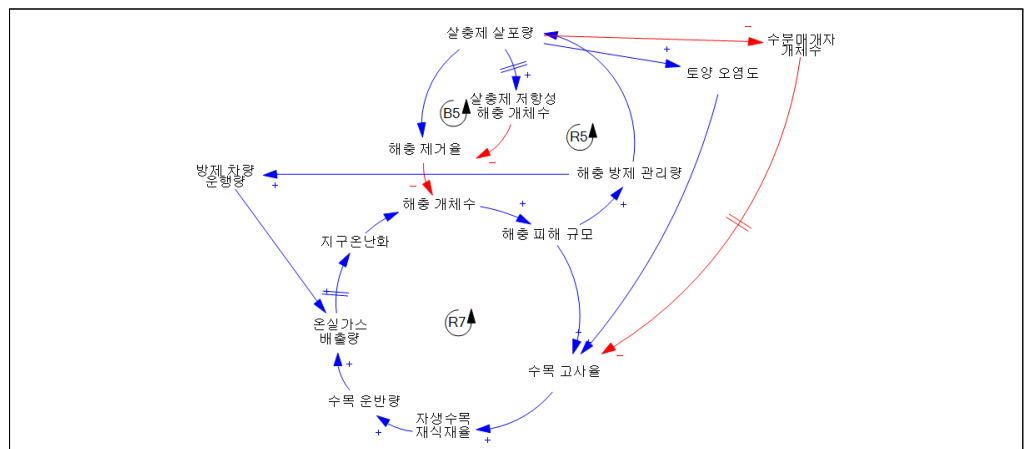


그림 5. 해충 방제 관리 인과순환지도

가 발생할 것으로 예측되었다. 이에 따라 추가적인 해충 방제량은 증가하고 지속적으로 해충 방제 관리는 악화되는 피드백 구조로 순환될 것으로 나타났다.

또한 현재 방제차를 이용하는 과정에서 차량 운행으로 인한 온실가스가 배출되는 것은 고려하지 않고 있다. 이에 따라 장기적으로 온실가스 배출 증가로 인한 지구온난화의 영향으로 해충의 개체수는 오히려 증가하는 R7 루프가 발생하면서 악순환이 지속될 것으로 예측된다. 뿐만 아니라 2022년 07월 21일 서울환경연합에 따르면 지난 5년간 월드킴공원에는 189.4kg의 고독성 농약을 사용한 것으로 발표하였다(<https://www.lak.co.kr/news/boardview.php?id=13824>). 이는 생물다양성과 연관이 높은 꿀벌에 독성이 강하고 생태독성이 높은 농약이 포함되어 있어, 식물의 생장을 돕는 행위가 오히려 장기적으로 생물다양성을 감소시키는 행위로 나타나는 것을 알 수 있다 (Takaharu, 2012). 특히, 고독성의 살충제는 사람에게도 생식독성과 발암가능성이 있어, 월드킴공원 이용자들에게도 악영향을 미칠 것으로 나타났다(<https://www.lak.co.kr/news/boardview.php?id=13824>).

4.2.3 전정 관리 인과순환지도

월드킴공원의 전정 관리에 대하여 분석한 결과(그림 6 참조), 전정 관리는 약전정으로 자주 관리해주는 것이 권고되지만 현실적으로 인건비와 시간상의 효율성에 근거하여 과전정을 하는 비율이 높다. 이러한 행위는 B6 루프처럼 단기적으로 보았을 때 전정 관리의 횟수를 줄이고 인건비를 절약하며 전정의 효과를 낼 수 있다. 그러나 장기적으로 보았을 때 과전정을 하면 맹아지가 자극되어 절단부에서 발생하는 맹아지의 양이 더 많아지게 되고, 이로 인해 오히려 전정 필요량을 더 증가시키는 R6 루프가 발생할 것으로 사료된다(최성태 등, 2006). 즉, 과전정은 단기적 대응책이 될 수는 있지만 장기적으로는 오히려 유지관리 부담을 가중시키는 악순환 구조를 형성할 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 과전정으로 인하여 식물체의 내성 정도가 약해지게 되면 해충이나 세균에 의한 감염으로 수목 고사율이 증가하게 되는 것으로 나타났다. 즉, 식물의 전정관리가 과전정으로 인하여 오히려 전정 필요량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전지전정시 발생하게 되는 임목 폐기물은 처리하는 과정에서 온실가스 배출을 하는 것으로 나타났으며 과전정으로 인하여 새의 서식지인 동지를 틀 수 있는 가지 또는 옹이 수가 감소하여 조류종 개체수의 감소로 이어질 것으로 나타났다.

4.2.4 시비 관리 인과순환지도

시비 관리에 대하여 인과순환지도로 분석한 결과는 그림 7과 같다. 서울시는 시비에 관하여 기비(밀거름)는 10월하순~11월하순 혹은 2월하순~3월하순에 사용하고 추비는 수목 생장기인 4월하순~6월하순까지의 기간에 작업한다. 수종별로는 교목 H2.0이상 4.0미만의 교목은 고품복합비료 210g과 부산물비료 5kg을 사용하고 교목 H4.0이상에는 고품복합비료 270g과 부산물비료 10kg를 사용하여 2회 해주는 것으로 권고하고 있다. 잔디의 시비는 복합비료를 1회에 제곱미터당 30g씩 연간 1회 진행해야 한다. 초화류는 연간 2회 제곱미터당 30g씩 진행해야 한다(기술심사담당관, 2023).

월드킴공원의 경우 공원녹지과에 확인한 결과, 현재 월드킴공원에서는 유기비료를 사용하여 시비관리를 진행하고 있는 것으로 확인되었다. 이에 따른 인과순환지도를 분석한 결과(그림 7 참조), 유기비료는 무기질 비료에 비해 분해 속도는 느리지만 장기적으로 토양 내 유기물 함량을 증가시키고 토양환경을 개선하며 식물의 지속적인 성장을 가능하게 하는 B7루프로 나타났다. 또한 수목의 영양분을 안정적으로 제공하여 해충 피해 및 세균의 감염도를 저하시키고 이는 장기적으로 수목 관리에 필요한 운반량도 감소시켜, 온실가스 배출량도 감소시키는 결과를 나타내는 것으로 확인되었다.

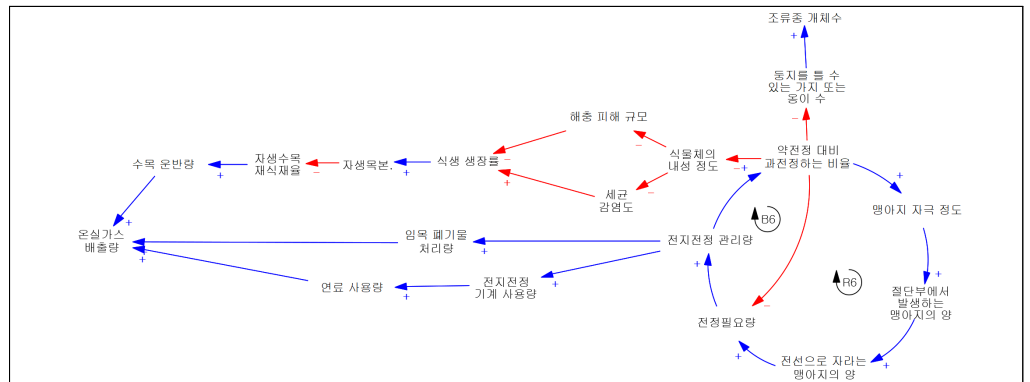


그림 6. 전정 관리 인과순환지도

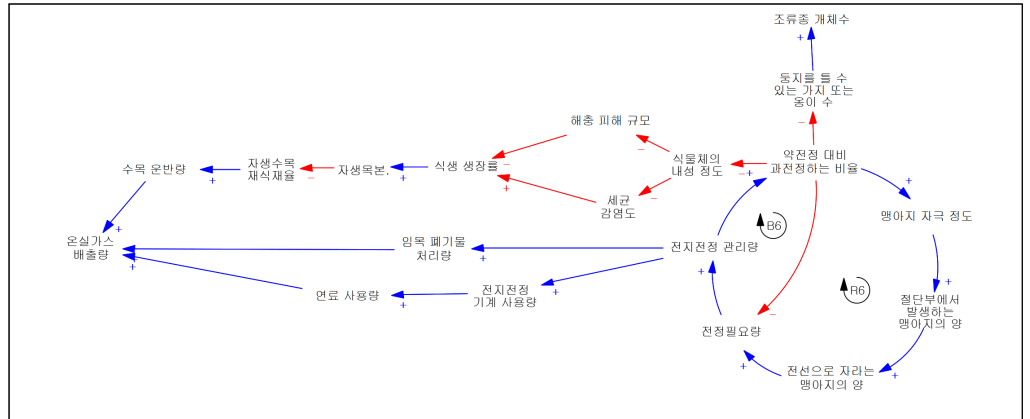


그림 7. 시비 관리 인과순환지도

4.3 Assess

앞서 도출된 월드캡공원의 유지관리에 대한 인과순환지도를 바탕으로 통합인과순환지도를 구축하여 개별 관리 방식이 어떻게 상호작용하며 유지관리 체계 전반에 영향을 미치는지를 평가하고 위기 및 기회에 대한 변수를 도출 하였다(그림 8 참조). 분석결과, 현재 외래종 관리, 해충 방제 관리, 전정 관리, 시비 관리는 각각 개별적으로 시행 되고 있지만 유지관리 방식들이 상호작용하며 특정 요소가 다른 요소에 영향을 미치는 복잡한 시스템을 형성하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 유지관리의 전체적인 시스템을 파악하여 위험요소와 기회요소를 도출하고 지속가능한 유지관리 체계를 구축하기 위한 방향성을 설정하는 것이 필요하다.

위험요소로는 부정적인 R루프를 형성하는 살충제 살포, 과전정, 온실가스 배출이 도출되었다. 먼저, 월드캡공원의 해충 방제 관리는 현재 살충제 살포를 중심으로 운영되고 있다. R1과 R2루프에서는 살충제 사용이 증가할수록 토양 오염과 수분매개자 개체수가 증가하고, 이는 식물 생장을 저하로 이어지게 된다. 이러한 변화는 외래종과 자생종의 생육에 영향을 미치며, 특히 외래종이 자생종보다 생육과 확산 속도가 빠르기 때문에 외래종의 개체수가 더욱 증가하게 된다. 이에 따라 외래종의 확산을 막기 위한 물리적 관리량이 지속적으로 증가하게 되며, 결국 온실가스 배출량 증가와 연료 사용 증가로 이어지는 R3, R4루프의 악순환을 만든다. 또한 해충 방제 관리로 인한 차량 운행은 지구 온난화의 원인이 되는 온실가스 배출량을 증가시키며 악순환을 만드는 R5루프를 형성한다. 따라서 화학적 방제 관리는 월드캡공원 유지관리의 위험요소로 도출되어, 살충제 의존도를 줄이고 대체 가능한 방제 방식을 통해 해충 피해 규모도 줄이면서 토양의 오염도도 감소시킬 수 있는 방향으로 전환될 필요성이 있다.

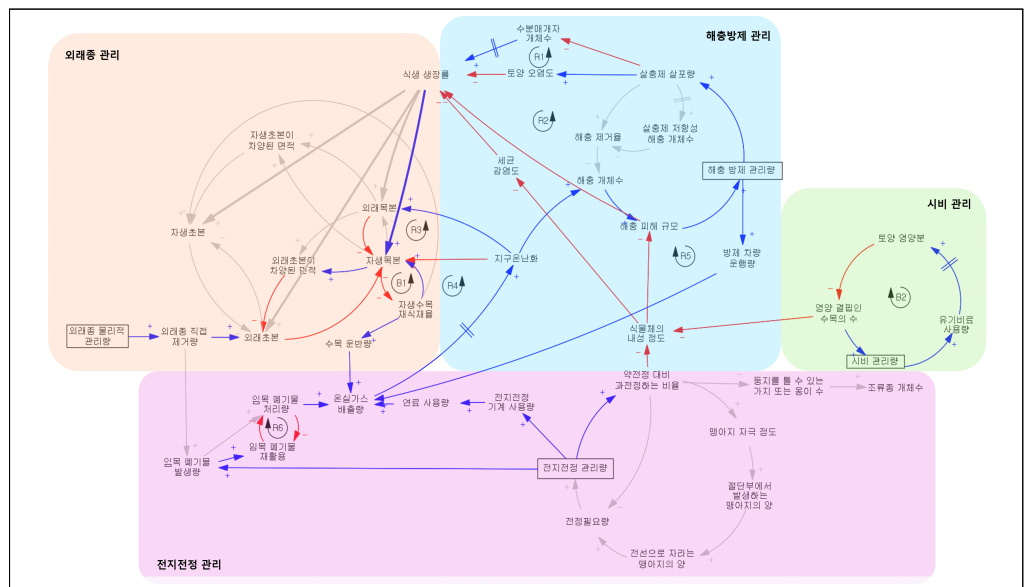


그림 8. 유지관리 통합인과순환지도

둘째, 전정 관리에서의 위험요소는 R1, R2, R3, R4루프의 악순환을 가속화시키는 요소로 과전정이 도출되었다. 유지관리의 효율성 및 편리성을 고려하여 과전정을 시행할 경우 조류의 개체수가 감소되는 문제로 이어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 과전정으로 인한 식물체 내성을 감소시켜 해충 및 세균 감염에 취약한 환경을 조성하며, 이로 인해 해충 피해 규모를 증가시켜, 방제 관리량을 증가시키는 결과로 이어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 과전정은 생태계 내 먹이사슬의 변화를 초래하여 월드컵공원 유지관리의 위험요소로 도출되었다.

마지막으로 외래종 관리, 해충 방제 관리, 전지전정 관리에서 발생하게 된 온실가스는 지구온난화를 가속화시켜, 해충 개체수를 증가시키는 R5루프, 다시 외래종과 자생종의 생육 환경을 악화시키는 R1, R2, R3, R4루프에 영향을 주는 위험요소로 분석되었다. 즉, 도시의 생물다양성을 증가시키고 탄소 흡수원으로서 관리되고 있는 월드컵공원의 현재 유지관리는 단기적인 측면에서의 문제점 해결과 편리성만을 고려하여 지속적으로 시행될 경우, 장기적으로 보았을 때 오히려 온실가스 배출량을 증가시키고 생물 다양성을 저하시키는 결과로 이어질 것으로 분석되었다. 특히 현재 월드컵공원은 집중호우, 태풍 등의 자연재해로 인한 피해목이나 고사목은 인력을 사용하여 직접 정비하고 있기 때문에(서부공원녹지사업소, 2022) 장기적인 측면에서 지구온난화로 인한 이상기후 현상 및 재난·재해 발생이 지속될 경우 추가적인 유지관리 부담이 가중될 것으로 확인되었다. 이에 따라 월드컵공원의 지속가능한 유지관리를 위하여 온실가스 배출을 줄이고, 장기적으로 기후 변화 대응력을 높이는 방향으로 유지관리 체계를 개선할 필요가 있다.

월드컵공원의 유지관리 체계에서 도출된 기회요소로는 시스템의 균형을 유지하는 균형 루프를 통해 자생종의 재식재율과 유기비료 사용량이 도출되었다. 먼저 B1루프에서 자생종의 재식재율에 따라 자생종의 서식 면적이 증가할수록 외래목본과 초본의 서식 면적이 감소하게 되어, 외래종 확산을 억제할 수 있는 방안으로 나타났다. 따라서 외래종을 제거하고 난 후에 그 자리에 자생종을 식재할 경우 외래종의 재확산을 억제하는 균형루프가 형성되어, 장기적으로 유지관리 비용을 절감하고 생물다양성을 보존하는 효과를 기대할 수 있다.

다음으로 B2루프와 같이 유기비료의 사용량은 토양의 영양분을 높여 장기적으로 토양환경을 개선하고 식물체의 내성정도를 높임으로써 해충 방제량을 저감시킬 수 있는 방안으로 도출되었다. 따라서 유기비료 사용을 확대하는 것이 기회요소로 도출되었다.

4.4 Prepare

앞서 도출된 위기요소와 기회요소를 바탕으로, 문제 상황을 반복적으로 심화시키는 특정 강화 루프(R 루프)의 영향을 완화하고, 시스템의 안정성과 회복력 증진에 기여하는 균형 루프(B 루프)의 기능을 강화하는 방향으로 유지관리 체계를 조정하기 위하여 파나키(Panarchy) 개념을 적용하였다. 파나키는 리질리언스 이론과 계층 이론에 기반한 개념으로, 다양한 공간·시간적 규모에서의 상호작용을 통해 작고 빠른 변화(리볼트)와 크고 느린 변화(리멤버)가 시스템 전체에 영향을 미치는 과정을 설명한다. 이러한 개념은 단기적 개입이 전체 생태계의 변화로 확산되거나, 기존의 안정적 시스템이 작은 변화의 회복력을 지지한다는 점에서 생태계의 복원력과 적응성을 함께 고려하는 데 유용하다. 따라서 월드컵공원의 유지관리 전략을 단기적 효율성과 장기적 생태적 안정성의 균형을 고려한 지속가능한 유지관리 전략을 제시하고자 파나키 개념을 접목하여 전략을 도출하였다(표 2 참조).

먼저, 해충 방제 관리 전략으로는 생물학적 방제 도입을 통해 살충제 사용량을 줄임으로써 토양 오염과 수분 매개자 개체수 감소, 해충의 내성 증가 등에 대한 문제를 해결할 필요가 있다. 그러나 현재까지는 병원 미생물 및 기

표 2. 월드컵공원의 유지관리를 위한 전략

전략 구분	단기전략	장기전략
해충 방제 전략	실험 구역에 생물학적 방제 시범 적용 인건비 감소 및 살충제 비산 피해 최소화를 위한 드론 방제 및 스마트 기술 도입	실험 구역 결과를 바탕으로 방제 관리를 점진적으로 확산 생태계 스스로 해충·천적 조절 가능한 환경 조성
전정 관리 전략	수목 수종, 수령, 건강상태에 따른 전정 우선순위 기준 마련 전정 강도 및 주기 조절로 과전정 방지 조류 생태조사를 바탕으로 민감시기 전정 최소화	조류 서식지 보호구역 지정 및 기준 마련 혼효림 및 다층구조 식재로 다양한 서식환경 조성
온실가스 저감 전략	드론 방제 활용으로 연료 및 온실가스 저감 임목 폐기물 재활용을 통해 식생기반 조성	저탄소 및 전기화 기술 도입 임목 폐기물의 자원화 및 신재생 에너지원 전환 연구 활성화
외래종 관리 전략	외래종 제거한 자리에 자생종 재식재	사회생태시스템의 통합적 접근

생충이나 천적을 이용한 생물학적 방제가 뚜렷한 효과를 보이는 방안이 발견되지 않아 사용에 한계가 있다(이인용 등, 2021). 특히, 공원의 생태계 시스템은 비연속적인 구조와 역동성을 지닌 복잡한 시스템으로 구성되어 있기 때문에, 단기적인 효과만을 중시한 관리 방식은 오히려 예상하지 못한 생물다양성 붕괴를 초래할 가능성이 있다(Twidwell et al., 2013). 따라서 살충제 사용량의 저감을 위한 특정 천적에 대한 단기적인 방제 효과 위주의 연구만으로는 생태계 건강성을 유지할 수가 없기에 월드컵공원에 서식하는 생물종을 조사하고 각 생물종의 이동 및 서식 특성을 파악하여 생물 간의 복잡한 상호작용에 대한 분석을 바탕으로 체계적인 방제 전략을 마련해야 한다. 이를 위하여 우선 단기적으로 실험 구역을 선정하여 생물학적 방제를 시범 적용하고 이에 대한 효과 및 모니터링 결과를 바탕으로 살충제의 영향을 파악할 필요가 있다. 또한 인간비 감소 및 살충제로 인한 비산 피해를 최소화하기 위하여 드론 방제와 같은 스마트 기술을 도입하여 정밀 방제를 수행하는 것도 실질적인 단기 대응책이 될 것이다(옥진아와 정효진, 2020). 이와 같은 실험 구역의 관리 방식은 작은 시스템의 기존 안정적인 관리 구조에서 다음 단계인 해체(0)에 해당하며, 이후 재조직화(α) 단계를 통해 새로운 해충 방제 관리의 효과 분석 및 결과 도출로 이어진다. 장기적으로는 앞서 특정 구역에 방제 효과를 검증한 결과를 바탕으로 점진적으로 공원 전체로 확산될 수 있도록 더 큰 시스템인 공원 전체의 보전된 단계에서 나아가 해충 방제 관리의 전환을 도입하여, 상위 시스템의 변화를 촉진하는 리볼트 전략이 필요하다. 이를 통해 관리의 초기 단계에 실험적 접근을 통해 최적의 방제법을 도출하여 공원 전체로 확산될 수 있도록 유도함으로써 예산의 낭비를 방지할 수 있을 것이다. 동시에 리멤버(remember) 개념을 적용하여 월드컵공원 전체 시스템이라는 상위 시스템의 보전(K) 단계에서 축적된 생태적 안정성을 바탕으로, 해충 피해가 발생한 국지적 지역이라는 하위 시스템의 재조직화(α) 단계에 영향을 미쳐 지속가능한 방제 전략이 정착될 수 있도록 유도할 필요가 있다. 즉, 장기적으로 안정된 월드컵공원의 생태계 시스템이 해충과 천적의 개체수를 조절하며 개별 해충 방제의 단기적인 효과보다는 생태계 스스로가 조절하고 회복할 수 있는 환경을 조성해주는 것이 궁극적인 해결책으로 적용될 수 있을 것이다. 이는 초기 비용이 발생할 수 있지만 장기적인 경제적 측면에서 보았을 때, 해충 방제 관리에 필요한 예산을 점차 감소시킬 것이다. 즉, 작고 빠른 변화를 활용하여 단기적 방제 효과를 극대화하는 동시에, 크고 느린 변화를 통해 장기적으로 월드컵공원의 생태적 건강성 유지와 생물다양성 보전에 기여하는 방향으로 전략을 수립해야 한다.

둘째, 전정 관리의 과전정은 인력비와 전정 횟수를 고려하였을 때 경제적이 될 수 있지만, 월드컵공원의 생태적 균형 파괴로 인한 생태계서비스 가치 하락까지 장기적으로 고려하였을 때에는 결코 경제적인 관리방식이 될 수 없다. 이에 따른 전략으로는 단기적으로 인력비를 줄이고 편리함을 추구하기 위한 과전정으로 급진적인 변화를 주는 것보다는 과거의 생태적 균형 상태를 유지하는 리멤버 특성을 강화하여 월드컵공원의 식물 생육 및 생태적 기능의 유지를 고려한 전정 방식으로 전환하는 것이 필요하다. 기존의 월드컵공원 생태계는 비교적 안정된 보전(K) 단계에 있으며, 다양한 식물군락과 조류 서식지 등 생물다양성이 유지되고 있는 상태이다. 이러한 상위 시스템에서 리멤버를 통해, 특정 구역에서 진행되는 전정으로 인하여 해체(0) 단계에서 재조직화(α) 단계로의 전환 과정에 영향을 미칠 수 있다. 즉, 전정 후의 공간은 기존 생태계 구조를 참조하여 식생이 재편되고 새로운 균형 상태로 이동할 수 있다. 예를 들어, 단기적으로는 전정 방식을 조정할 때 수목의 수종, 수령, 위치, 건강상태 등을 고려하여 전정 우선 순위 기준을 마련하고 이를 바탕으로 전정 강도와 주기를 조절할 필요가 있다. 이를 통해 과전정으로 인한 부정적 영향을 줄이고, 수목의 건강성을 유지할 수 있도록 관리할 필요가 있으며 관리 인력에게 사전 교육도 병행할 필요가 있다. 또한 조류의 생태시스템을 보호하기 위하여 계절별 조류 군집을 조사하고 각 조류의 먹이 및 서식지에 대한 환경을 조사하여 관리방안을 수립할 필요가 있다(황현수 등, 2024). 특히 동지의 위치나 번식 시기에는 전정 주기를 수정하거나 부분 전정 방식으로 전환하는 등의 방안 마련이 필요하다. 장기적으로는 앞서 파악한 조류의 생태적 조사 내용을 바탕으로 조류 서식지 보호를 위한 전정의 기준을 마련하고 조류 서식지 보호구역을 지정하는 등 생물다양성 보전을 고려한 전정 전략을 수립해야 한다. 실제 서울시에서는 도심 하천 내 철새의 유입 증진과 생태 학습장으로서의 활용을 위하여 중랑천하류, 청계천하류, 안양천하류에 철새보호구역을 지정하여 관리하고 있는데(<https://parks.seoul.go.kr/ecoinfo/ecology/index.do>), 하천뿐만 아니라 도심의 생태적 가치가 높은 지역을 대상으로 철새 보호구역을 확대 지정할 필요가 있다. 특히, 단일구조의 환경보다는 다양한 서식 환경이 혼재할 수 있도록 혼효림과 다층구조의 식재를 조성하여 다양한 조류가 서식할 수 있는 환경을 만들어주는 것이 중요하다. 이는 조류뿐만 아니라 월드컵공원을 이용하는 공원 방문객에게도 쾌적한 녹지 환경을 제공하고, 자연 관찰 및 생태 교육의 기회를 확대하는 등 정서적·교육적 측면에서 긍정적인 효과를 줄 수 있을 것이다. 또한, 조류 서식지의 보호와 함께 다양한 식재 구조를 도입함으로써 계절별 경관의 변화가 풍부해져 공원의 미적 가치와 이용 만족도를 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 또한 서식지의 경사도에 따라 토양 유실이 발생할 경우, 조류의 먹이원에 영향을 줄 수 있는데(황현수 등, 2024), 월드컵공원의 경우 쓰레기 매립으로 경사지가 조성되어 있어, 지속적인 모니터링 및 토양

관리가 중요할 것으로 사료된다. 이와 더불어 각 구역의 식물 특성에 따라 전정 방식을 차별화하고 전정 빈도를 조절하는 것은 작은 스케일에서의 각 전정 관리가 기존 식생 구조의 일시적 해체를 유도하는 해체(Q) 단계로 이어질 수 있다. 이와 같은 변화는 실험적 구역 또는 일부분의 전정 관리 변화로 인한 해체 단계가 더 큰 스케일의 생태시스템의 보전(K) 단계에 영향을 주어 기존 유지관리 방식에 변화를 유도하게 된다. 즉, 소규모 구역에서 시작된 전정 방식의 변화가 전체 시스템의 생태계 구조에 영향을 주는 과정은, 작은 시스템의 해체 단계가 큰 시스템의 보전 단계에 영향을 주는 파나키 이론의 리볼트(revolt) 개념에 해당한다고 볼 수 있다.

셋째, 유지관리시 발생하는 온실가스를 저감시키기 위해서는 우선 단계적으로 연료 사용량이 많은 방제 차량 운영을 최소화할 필요가 있다. 소규모 지역의 유지관리 작업 시에는 무인 항공기를 활용하여 연료 사용 및 온실가스 발생을 저감시킬 수 있다. 또한 유지관리 시 발생하는 임목 폐기물은 단순 소각이나 폐기보다는 현장에서 다양한 크기로 파쇄하여 산림표층토양과 유사한 환경을 조성하여 대상지의 우수한 식생기반환경을 조성하고 다양한 식물이 지속적으로 생육할 수 있는 시스템을 구축할 수 있다(남상준, 2007). 장기적으로는 저탄소 기술 및 전기화하는 등의 친환경 유지관리 기술을 개발하고 점진적으로 도입하여 단계적인 확산을 도모할 필요가 있다. 이는 연료 사용 저감 및 임목 폐기물 전환이라는 작은 관리 방식의 해체(Q) 단계가 장기적으로 월드킵공원 전체 시스템의 대기 보전(K) 단계에 영향을 미치는 리볼트 과정으로 이어진다.

또한 유지관리 과정에서 발생하는 임목 폐기물에 대해서도 단순 폐기나 소각 대신 다양한 크기로 파쇄하여 토양 개량제로 활용하는 방식은, 기존 생태계가 갖고 있는 자연적 순환 기능을 활성화하는 전략이다. 이러한 접근은 월드킵공원이라는 상위 시스템의 보전(K) 단계에서 축적된 생태적 순환 기억이, 임목 폐기물 재활용이라는 하위 시스템의 재조직화(α) 단계에 영향을 주는 과정으로 해석될 수 있으며, 이는 리멤버(remember) 전략에 해당한다. 이를 통해 기존의 임목 폐기물 재활용을 통해 기회요소로 도출된 유기비료 사용량을 증가시키는 생태적 순환 구조를 고려하여 공원 내에서 발생하는 유기물 쓰레기를 퇴비화함으로써 시비 관리에 활용하는 방식으로 온실가스 배출을 줄일 수 있다. 다만 퇴비화 과정에서 온실가스가 발생하기 때문에 첨가제를 활용하여(정성순 등, 2023) 온실가스 배출을 줄이는 등 다양한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 접근 방식의 월드킵공원 온실가스 저감 방안을 통해 월드킵공원의 탄소 배출원들을 저감하면서 기존 공원의 온실가스 순환 시스템의 유지도 도모할 수 있는 전략으로 작용할 수 있을 것이다. 또한 남양주시에서는 공원, 녹지, 가로수 관리 과정에서 발생하는 연간 약 500톤의 임목 폐기물을 에너지 기업에서 재활용할 수 있도록 제공하여 목재칩으로 사용할 수 있도록 시행하고 있으며 서울시에서도 한강공원 임목폐기물을 활용하여 자원화하고 있다. 이처럼 임목폐기물을 신재생에너지원으로 전환하는 것도 방안이 될 수 있을 것이다(<https://www.kyeongin.com/article/1730694>). 이를 통해 서울시의 지속가능한 친환경 공원으로써 환경 보호와 기후 변화 대응에 선도적인 역할을 수행하며, 시민들에게 건강하고 쾌적한 녹지 공간을 제공하는 모델로써 공원의 브랜드 가치 상승을 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 나아가, 탄소 배출 저감 및 생태계 보호 노력이 인정될 경우 쓰레기 매립지 공원을 넘어서 유지관리까지 지속가능한 생태적 가치를 반영한 공원으로, 친환경 도시 조성 관련 정부 지원 및 민간 투자 유치에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것이다.

마지막으로 외래종 관리 전략에서는 우선 단계적인 전략으로 현재 시행 중인 물리적 제거 방식의 효율성과 지속 가능성을 높이기 위한 보완책이 필요하다. 현재 물리적 제거 중심의 리볼트 전략에 집중되어 있어, 지속적인 관리에 부담을 초래하며 자생종이 제대로 정착하지 못하면 외래종이 다시 확산될 위험이 있을 것으로 분석되었다. 특히 물리적 제거 중심의 외래종 관리 방식은 지속적인 노동력 투입과 비용이 소요되기 때문에 장기적으로 관리 부담이 증가하는 구조를 가진다. 이에 따라 생물학적 방제를 통해 외래종 관리를 도입하는 방안이 고려될 수 있지만, 현재는 성공률이 낮고 오히려 새로운 해충의 침입으로 예측 불가능한 결과를 초래할 수 있다(Culliney, 2005). 따라서 외래종을 제거한 자리에 앞서 도출된 기회요소인 자생종 재식재움을 증가시켜 생태적 천이를 유도하는 리멤버 전략이 지속가능한 월드킵공원의 생태계를 강화시킬 수 있을 것이다. 자생종 식재 이후, 상위 시스템의 보전(K) 단계에서 축적된 기억을 바탕으로 생태적 천이를 유도시켜, 관리 비용을 점진적으로 감소시키고, 공원의 생태계를 장기적으로 안정화하는 효과를 기대하는 리멤버 전략이 적용될 수 있다. 장기적으로는 월드킵공원과 같이 이용률이 높은 공원에서는 생태적 변화뿐만 아니라 사회적 영향도 고려한 사회생태시스템의 통합적 관점에서의 접근이 요구된다. 구체적으로, 외래종의 우점도가 높은 지역에서는 식생구조에 급격한 변화를 발생시키지 않도록 여러번에 걸쳐 간벌을 시행하여 점진적으로 교목층의 광투과율을 높이고 중장기적으로 생태적 천이를 유도할 필요성이 있다. 특히, 외래종의 우점치가 30% 이하인 천이초기형 구역에서는 자생종과 경쟁하는 외래종을 우선적으로 간벌하여(김중엽과 이경제, 2012) 생태계의 리질리언스 향상에 기여할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 월드컵공원의 유지관리 시스템이 생물다양성에 미치는 영향을 평가하고 지속가능한 관리 전략을 수립하기 위하여 시스템 사고를 바탕으로 TNFD의 LEAP 접근법에 기반한 분석을 시행하고자 하였다. 이를 위하여 LEAP 접근법에 따라 Locate 단계에서는 월드컵공원의 자연자본에 대한 주요 변수를 도출하였다. 다음으로 Evaluate 단계에서는 도출된 변수 간의 인과관계를 분석하여 시스템의 피드백 구조를 파악하였다. 분석 결과, 외래종 관리에서는 물리적 제거와 자생종 재식재를 통해 확산을 억제하고 있으나, 외래종의 빠른 생장으로 물리적 관리량이 지속적으로 증가하고 있으며 이에 따른 임목 폐기물 발생과 온실가스 배출 증가가 문제로 나타났다. 해충 방제는 살충제를 활용한 방식으로 진행되지만, 이 과정에서 온실가스 배출과 생태독성이 높은 농약 사용이 문제로 나타났다. 또한 살충제 내성을 가진 해충 개체수가 증가하면서 방제 효과가 점차 감소하는 악순환이 발생하고 있다. 월드컵공원의 전정 관리는 인건비 절감을 위해 과전정이 주로 이루어지고 있으나, 이는 장기적으로 맹아지 증가와 식물 내성 저하로 인해 전정 필요량을 더욱 증가시키는 문제를 초래한다. 이와 더불어 과전정으로 인해 온실가스 배출과 조류 서식지 감소가 발생하며, 생태계 전반에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 시비관리에서는 유기비료를 활용하여 양의 영양분을 장기적으로 개선하여 수목의 영양 결핍을 줄이고 고사율을 낮추는 데 기여하고 있다. 이후 Assess 단계에서 개별 인과순환지도를 통합하여 월드컵공원 전체의 유지관리에 대한 강화와 균형 피드백 구조를 파악하고 위험 요소와 기회 요소를 도출하였다. 위험 요소로는 부정적인 R루프를 형성하는 살충제 살포, 과전정, 온실가스 배출이 도출되었으며, 기회 요소로는 균형 루프를 통해 시스템의 안정성을 유지하는 자생종의 재식재 증가와 유기비료 사용 확대가 확인되었다. 마지막으로 Prepare 단계에서는 앞서 도출된 위험, 기회요소에 대하여 파나키 개념의 리볼트(revolt)와 리멤버(remember)를 적용하여 월드컵공원 리질리언스 강화를 위한 전략을 도출하였다. 단기적인 변화가 더 큰 시스템으로 확산되는 리볼트 전략을 기반으로, 해충 방제에서는 특정 구역에서 효과적인 생물학적 방제를 도입한 후 점진적으로 확대하는 방안을 제시하였으며, 전정 관리에서는 과전정을 지양하고 식물의 특성에 따른 차별화된 전정 방식으로 전환하여 생태계 교란을 최소화하도록 하였다. 또한, 온실가스 저감을 위해 친환경 유지관리 기술을 단계적으로 도입하여 공원의 전체 시스템 안정화로 확산시키는 전략을 적용하였다. 동시에 리멤버 전략을 활용하여, 기존의 생태적 균형을 유지하면서 자연적 순환 기능을 활성화할 수 있도록 전정 폐기물을 우드칩으로 가공해 토양 개량제로 활용하고, 외래종 관리에서는 자생종을 재식재하여 장기적인 생태적 천이를 유도하는 방안을 제안하였다. 이를 통해 공원의 생물다양성을 증진시키고 장기적으로 생태계의 회복력과 지속가능성을 확보하고자 하였다.

본 연구는 월드컵공원을 대상으로 시스템 사고의 연구방법론과 인과순환지도를 응용하여 LEAP 접근법을 단계적으로 제시하였다는 점에서 의의가 있다. 또한 파나키 개념을 적용하여 리볼트 전략과 리멤버 전략을 균형 있게 활용하는 관리 방안을 제시함으로써 도시공원의 유지관리를 단기적인 문제 해결이 아닌 장기적인 생태계 회복력 강화 관점에서 접근할 수 있도록 하였다. 이러한 전략들은 향후 도시공원의 유지관리 체계에 적용될 가능성이 있으며, 생물다양성 보전과 기후변화 대응을 고려한 친환경 유지관리 정책 수립에 실질적인 방향성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 향후에는 자연자본 리스크에 대한 정보공개와 책임경영이 민간 부문뿐만 아니라 공공부문과 민관협력 기반 사업에서도 중요해질 것으로 전망된다. 이에 따라 공원 관리와 같은 준공공영역에서도 TNFD 지표 체계를 토대로 관리성과를 진단하고 지속가능한 투자 및 운영 전략 수립에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 이러한 맥락에서 본 연구를 통한 기대효과는 다음과 같다. 이론적 측면에서는 TNFD, 시스템 사고, 파나키 이론을 통합한 새로운 분석 패러다임을 제시하여 조정학의 이론적 지평을 확장할 수 있다. 방법론적 측면에서는 인과순환지도 기반 LEAP 접근법 적용 모델을 개발하여 도시공원 관리의 과학적 의사결정 도구를 제공할 수 있다. 실무적 측면에서는 월드컵공원의 구체적 관리 개선방안을 제시함으로써 서울시 공원 관리 정책에 직접적으로 기여할 수 있다. 정책적 측면에서는 TNFD의 공공부문 확산과 자연자본 회계 도입을 위한 실증적 기초자료로 활용될 수 있으며, 국가 단위 생물다양성 전략 수립에도 기여할 수 있다. 궁극적으로 본 연구는 도시공원 관리의 패러다임을 기존의 시설물 중심 접근에서 생태계 기능과 생물다양성 중심의 통합적 접근으로 전환하고, 국제적 지속가능성 기준에 부합하는 공공 녹지 관리 체계 구축에 기여함으로써 도시의 자연자본 기반 강화와 생물다양성 보전이라는 시대적 과제에 대응하고자 한다. 특히 연구 결과를 실질적으로 활용하기 위해서는 LEAP 접근법을 기반으로 한 도시공원 유지관리 가이드라인을 개발할 필요가 있으며, 본 연구에서 제시한 각 유지관리별 변수들을 토대로 생물다양성 보전을 고려한 유지관리 기준을 마련한다면, 지속가능한 조정 유지관리 정책 적용에 기여할 수 있을 것이다. 나아가 녹색건축 인증(녹색건축 인증에 관한 규칙)처럼 친환경 공원 인증 제도를 도입하여 도시공원의 생태적 지속가능성을 객관적으로 평가하고, 생물다양성 보전 기여도, 온실가스 저감 효과 등을 종합적으로 고려하여 유지관리 방식의 친환경성

을 검증할 수 있을 것이다. 또한 공원의 유지관리 단계까지 LEAP 접근법에 기반하여 평가한 새로운 도시공원의 인증 시스템을 도입한다면 공원의 가치를 객관적으로 검증함으로써 정부 지원 확대, 민간 투자 유치, ESG 경영 지표 활용과 연계할 수 있을 것이며 공공 기관과 기업이 지속가능한 관리 방식 도입을 적극적으로 추진하도록 유도할 수 있을 것이다. 즉, 본 연구에서 개발된 분석틀은 다른 도시공원은 물론 국립공원, 생태공원 등 다양한 보호지역 관리에도 적용 가능하며, 국가 단위 자연자본 관리 체계 구축과 UN 생물다양성 프레임워크 이행에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

다만 본 연구는 인과순환지도를 활용하여 유지관리 방식 간의 상호작용과 피드백 구조를 분석하는 질적 연구에 초점을 맞추었으며, 유지관리 전략의 정량적 효과를 직접 측정하지 못하였다는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 외래종 제거량과 자생종 증가율 간의 상관관계 분석, 해충 방제 방식별 생물다양성 변화를 측정, 전정 방식이 조류 서식지에 미치는 영향 평가 등 실증적 데이터를 활용한 정량적 분석이 필요하다. 또한, 이러한 데이터를 기반으로 도시공원의 유지관리 방식이 생물다양성에 미치는 영향을 시뮬레이션하고, 최적의 유지관리 전략을 도출하는 연구가 수행될 필요가 있다. 이를 통해 본 연구에서 제시한 전략들의 실효성을 보다 객관적으로 검증하고, 지속가능한 공원 유지관리 방안을 보다 구체적으로 제시할 수 있을 것이다.

References

1. 구경아, 차은지, 이재호, 김민정, 주우영(2021) 국가생물다양성 전략-관리지표-이행평가-실효성평가 통합시스템 구축 방안 연구. 기본연구보고서.
2. 권덕호(2021). 살충제 저항성 발달 현황 및 관리. (사)한국농약과학회 2021년 임시총회 및 추계학술발표회, 특별강연 2. 한국농약과학회.
3. 기술심사담당관(2023) 서울시 공원녹지분야 품셈적용 지침. 서울시 보고서.
4. 김도윤, 석영선, 전진형(2023). 민간공원 특례사업이 도시공원의 생태계 서비스에 미치는 영향 경기도 광주시 중앙근린공원을 중심으로. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 51(4): 31-45.
5. 김도훈, 문태훈, 김동환(1999) 시스템 다이내믹스. 서울: 대영문화사.
6. 김동환(2004). 시스템사고. 성남: 선학사.
7. 김은섭, 김호석, 이동근, 최윤영, 김다슬(2024) TNFD 적용을 위한 국내 활용가능 데이터 적용 방안 검토. 한국환경복원기술학회지 27(1): 55-70.
8. 김의주, 김미희, 이수인, 홍용식, 이응필, 박재훈, 이승연, 조규태, 유영한(2018). 침입외래식물 단풍잎돼지풀 (*Ambrosia trifida* L.)이 식물종다양성과준위협종 층층둥굴레(*Polygonatum stenophyllum* Maxim.)의 활력도에 미치는 영향 및 서식지 보전을 위한 관리방안. 한국습지학회지 20(3): 249-255.
9. 김종엽, 이경재(2012) 국립공원 인공림 식생구조 및 생태적 천이 유도를 위한 간벌 밀도 연구 1a-치악산, 속리산, 덕유산, 내장산을 사례로. 한국환경생태학회지 26(4): 604-619.
10. 남상준(2007). 산림표층토 및 식물발생재(임목폐기물)를 재활용한 복원녹화기술. Bulletin of Korea Environmental Preservation Association 29: 40-44.
11. 문태훈(2012) 시스템사고로 본 우리나라 사회갈등의 구조와 갈등해소를 위한 정책방향. 한국시스템다이내믹스 연구 13(1): 41-62.
12. 박정수(2021). 시스템다이내믹스를 활용한 도시철도 서비스품질 개선에 관한 연구. 한국도시철도학회논문집 9(1): 799-811.
13. 박현심, 구분학(2025) TNFD 공시 대응을 위한 훼손지 생태복원사업의 서식처가치 평가-InVEST 모델 분석을 사례로. 한국환경복원기술학회지 28(1): 37-52.
14. 서울시(2023) 서울시 공원녹지분야 품셈적용 지침.
15. 서부공원녹지사업소(2022) 2022년 월드컵공원 매립지사면 식생 관리계획. 서울시 보고서.
16. 서부공원여가센터(2023) 2023년 월드컵공원 생태계교란 생물 관리계획. 서울시 보고서.
17. 서부공원여가센터(2024). 2024년 월드컵공원 생태계 교란 생물 관리계획. 서울시 보고서.
18. 손병도, 이경재(2004) 월드컵공원 자연생태계 모니터링을 통한 생태적 관리방안. 한국환경생태학회 2004년도 정기총회 및 학술논문 발표회. pp. 211-215.
19. 여밀림(2023) 자연 관련 재무정보 공개 태스크포스(TNFD)의 주요 내용과 향후 전망. 자본시장포커스 2023-05.

20. 옥진아, 정효진(2020). 드론을 활용한 방제·방역체계 지원방안. 정책연구: 1-122.
21. 유미진, 함은미(2019). 시스템다이내믹스를 활용한 국내청소년 사이버불링피해 모델 개발. Journal of Korean Academy of Nursing 49(4).
22. 이나겸, 황혜미, 김다슬, 이동근(2025) 국내 TNFD 공시 지원을 위한 ENCORE 데이터베이스 기반 산업 유형별 의존도 평가. 한국환경복원기술학회지 28(1): 69-80.
23. 이인용, 김승환, 홍선희(2021) 생태계교란식물인 돼지풀, 단풍잎돼지풀, 환삼덩굴의 발생특성과 관리. Weed&Turfgrass Science 10(3): 227-242.
24. 이지현(2014). Resilient Operation System for Large Parks. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
25. 이현우, 김충기, 홍현정, 노영희, 강상인, 김종호, 신상철, 이수재(2015) 자연자본의 지속가능성 제고를 위한 의사결정 지원체계 개발-생태계서비스 분석을 중심으로. 한국환경연구원 사업보고서. 3479-3651.
26. 이현지, 유수진, 전진형(2015). 시스템 사고를 통한 다기능 생태저류지의 관리방안-광명 안터생태공원을 중심으로. 한국환경복원기술학회지 18(2): 1-17.
27. 이훈중(2021) 우리나라 생태계서비스 가치의 시공간 변화 및 특성-1980년대 말부터 2000년대 말 사이의 토지변화를 중심으로. 대한지리학회지 56(6): 675-704.
28. 장의선(2007) 시스템 사고를 배경으로 한 지리적 사고의 재구성. 한국지리환경교육학회지(구 지리환경교육) 15(1): 77-92.
29. 정석순, 박병준, 윤정환, 이상필, 양재의, 김혁수(2023) 첨가제가 유기성 폐기물 퇴비화 과정 중 온실가스 발생에 미치는 영향: 리뷰 및 데이터 분석. 한국환경농학회지 42(4): 358-370.
30. 정재운, 김현수(2007) 인과지도의 타당성 확보와 정보 표현력 향상을 위한 연구. 한국시스템다이내믹스 연구 8(1): 97-115.
31. 조도순(2024) [특별기고]“TNFD는 자연과 생물다양성 보전·복원 촉진제”. 월간환경 280: 114-117.
32. 최남희(2003) 시스템 다이내믹스 기법을 이용한 서울시 도시동태성 분석과 정책지렛대 탐색: 인과순환구조와 시스템 형태 분석을 중심으로. 한국행정학보 37(4): 329-359.
33. 최선미, 구본학(2025). TNFD와의 연계를 위한 환경영향평가 및 영향 저감 개선 방안-산업단지 조성사업 포유류 조사를 중심으로. 한국환경복원기술학회지(환경복원기술) 28(1): 53-68.
34. 최성태, 김학규, 김성철, 최태민, 강성모, 박운문(2006). 변칙주간형을 개심형과 Y자형으로 갱신한 ‘부유’ 감나무의 수체 반응. 원예과학기술지 24(3): 376-381.
35. 최윤의, 유수진, 함은경, 송기환, 전진형. (2014). 시스템 사고를 통한 생태관광자원의 지속가능한 관리방안 연구-서울시 밤섬을 중심으로. 관광학연구 38(5): 59-78.
36. 추병주, 정운수(2006) 시스템다이내믹스 방법론을 적용한 주민참여 유인 분석. 지방행정연구 20(1): 131-164.
37. 태미경, 김민, 전진형(2024). 베트남 맹그로브 숲의 생태계 서비스 트레이드오프 분석을 통한 회복력 있는 해안자원 관리 방안 제시. 한국시스템다이내믹스 연구 25(1): 87-113.
38. 한동균, 조의호(2015) 사회과 지속가능성교육을 위한 환경소양과 시스템사고의 관계 탐색. 사회과교육 54(2): 65-83.
39. 한봉호, 박석철, 최한별(2023) 월드컵공원 사면지구 식생현황 및 변화 특성 연구. 한국조경학회지 51(4): 1-15.
40. 황현수, 김혜진, 이운경, 신현철, 차현기(2024) 특정도서에 서식하는 조류 군집의 다양성에 영향을 미치는 서식지 특성. 한국환경생태학회지 38(5): 459-464.
41. Allen, C. R., D. G. Angeler, A. S. Garmestani, L. H. Gunderson and C. S. Holling(2014) Panarchy: theory and application. Ecosystems 17: 578-589.
42. Carreiro, M. M. and W. C. Zipperer(2011) Co-adapting societal and ecological interactions following large disturbances in urban park woodlands. Austral Ecology 36(8): 904-915.
43. Culliney, T. W.(2005) Benefits of classical biological control for managing invasive plants. Critical Reviews in Plant Sciences 24(2): 131-150.
44. Deweerdt, T., K. Caltabiano and P. Dargusch(2022) How will the TNFD impact the health sector’s nature-risks management?. International Journal of Environmental Research and Public Health 19(20): 13345.
45. Garmestani, A., D. Twidwell, D. G. Angeler, S. Sundstrom, C. Barichievy, B. C. Chaffin, T. Eason, N. Graham, D. Granholm and L. Gunderson(2020) Panarchy: opportunities and challenges for ecosystem

- management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 18(10): 576–583.
46. Gotts, N. M.(2007) Resilience, panarchy, and world-systems analysis. *Ecology and Society* 12(1).
 47. Holling, C. S. and L. H. Gunderson(2002) Resilience and adaptive cycles. Washington DC: Island Press.
 48. Nacher, M. E., C. S. S. Ferreira, M. Jones and Z. Kalantari(2021) Application of the Adaptive Cycle and Panarchy in La Marjalera Social-Ecological System: Reflections for Operability. *Land* 10(9).
 49. OECD(2021) Biodiversity, natural capital and the economy: A policy guide for finance, economic and environment ministers. OECD Environment Policy Paper 26.
 50. Secretariat of the Convention on Biological Diversity(2020) Global Biodiversity Outlook 5. Convention on Biological Diversity.
 51. Senge, P. M.(1990) The fifth discipline: The art and practice of the learning organization. *Human Resource Management* 29(3): 343.
 52. Taniguchi, T., Y. Kita, T. Matsumoto, and K. Kimura(2012) Honeybee colony losses during 2008~ 2010 caused by pesticide application in Japan. *Journal of Apiculture* 27(1): 15–27.
 53. TNFD.(2023a) Recommendations of the taskforce on nature-related financial disclosures (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures.
 54. TNFD(2023b) Getting started with adoption of the TNFD recommendations Version 1.0 (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures.
 55. TNFD(2023c) Guidance on the identification and assessment of nature-related issues: The LEAP approach (The Taskforce on Nature-related Financial Disclosures.
 56. TNFD(2024) Over 500 organisations and \$17.7 trillion AUM now committed to TNFD-aligned risk management and corporate reporting. <https://tnfd.global/over-500-organisations-and-17-7-trillion-aum-now-committed-to-tnfd-aligned-risk-management-and-corporate-reporting/>
 57. Culliney, T. W.(2005) Benefits of classical biological control for managing invasive plants. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24(2): 131–150.
 58. Twidwell, D., B. W. Allred and S. D. Fuhlendorf(2013) National-scale assessment of ecological content in the world's largest land management framework. *Ecosphere* 4(8): 1–27.
 59. Wang, G., Y. Sun, M. Zhou, N. Guan, Y. Wang, R. Jiang, Z. Liu, M. Wu and F. Xia(2021) Effect of thinning intensity on understory herbaceous diversity and biomass in mixed coniferous and broad-leaved forests of Changbai Mountain. *Forest Ecosystems* 8(53). <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00331-x>.
 60. Xinghua, F., X. U. Meihai, L. I. Qiyue, P. Y. Becky and X. Chunliang(2025) Urban resilience and panarchy: Insights from Nanchang City, China. *Cities* 162: 105934.
 61. Zhang, L., Z. Zhao, B. Jiang, B. Baoyin, Z. Cui, H. Wang, Q. Li and J. Cui(2024). Effects of long-term application of nitrogen fertilizer on soil acidification and biological properties in China: A meta-analysis. *Microorganisms* 12(8): 1683. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081683>.
 62. <https://opengov.seoul.go.kr/budget/30201814>
 63. <https://parks.seoul.go.kr/eoinfo/ecology/index.do>
 64. <https://parks.seoul.go.kr/parks/detailView.do?pldx=6>
 65. <https://rrf.seoul.go.kr/content/acwad144.do>
 66. <https://vensim.com/>
 67. <https://www.aurum.re.kr/Research/PostView.aspx?mm=1&ss=1&pid=10355>
 68. <https://www.kyeongin.com/article/1730694>
 69. <https://www.lak.co.kr/news/boardview.php?id=13824>