한국조경학회지 54(5): 61~85, 2026. 10.
J. KILA Vol. 54, No. 5, pp. 61~85, October, 2026
pISSN 1225-1755 eISSN 2288-9566
https://doi.org/10.9715/KILA.2026.54.5.061

도시녹지의 기능 기반 분류체계 구축을 위한 체계적 문헌 고찰†

A Systematic Review for Developing a Function-based Classification Framework of Urban Green Spaces†

황해권*, 김용환*, 이승현*, 손용훈,*****
*서울대학교 환경대학원 협동과정 조경학 박사수료, **서울대학교 환경대학원 환경설계학과 교수, ***서울대학교 환경계획연구소 겸무연구원

Hwang, Haekwon*, Kim, Yonghwan*, Lee, Seunghyeon*, Son, Yonghoon,*****
*Ph.D. Candidate, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University
**Professor, Dept. of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University
***Adjunct Researcher, Environmental Planning Institute, Seoul National University

Received: July 27, 2026
Revised: August 28, 2026
Accepted: August 28, 2026
3인익명 심사필

Corresponding author :
Yonghoon Son
Professor, Dept. of Environmental Design, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul 08826, Korea
Tel.: +82-2-880-8107
E-mail: sonyh@snu.ac.kr

국문초록

도시화와 고밀 개발이 가속되면서 도시녹지가 제공하는 질적 가치의 중요성이 커지고 있다. 도시녹지는 생태·사회·경제적 다기능성을 지닌 도시 생태계의 핵심 요소이나, 기능 평가 연구마다 분류 범주와 지표가 상이하여 통합 기준이 부재하다. 한국의 현행 분류도 면적·유치거리 등 물리적 속성에 기반하여 기능적 성격과 비공식 녹지를 반영하지 못한다. 본 연구는 기능 단위 분류의 토대로서 기존 기능–지표 체계를 통합한 지표 프레임워크를 도출하였다. PRISMA 2020에 따라 WoS·Scopus에서 247편을 선정하고 1,915개 기능–지표 연결을 표준화하여 기능 24개와 측정도메인 23종을 도출하였다. 기능×지표 행렬에 Ward 군집분석을 적용해 6개 기능군과 1개 메타축을 구성하고, 1,000회 부트스트랩으로 응집도를 점검한 결과 F4·F6은 높았으나 F1은 낮아 개념적 공통성에 근거한 해석적 기능군으로 구분되었다. CICES 대응 결과 연결의 약 80%는 기존 클래스에 대응하였고, 약 20%는 CICES가 서비스로 계상하지 않는 생태적 상태, 이용·형평, 사회적 관계 등으로, 이는 누락이 아닌 평가 문헌과 분류 범위 간 차이를 나타낸다. 지표는 캐스케이드 모델에 따라 핵심·보조지표로 구분하고 TF-IDF 가중치를 부여하였다. 본 연구는 지표를 조직 원리로 분산된 평가 관행을 통합하고, 법정 유형과 무관한 기능 기반 유형화의 기초 자료를 제공한다.

주제어: 생태계서비스, 다기능성, 그린인프라 계획, 환경정의

ABSTRACT

As urbanization and high-density development accelerate, the qualitative value of urban green space (UGS) is becoming increasingly important. UGS is a core component of urban ecosystems with ecological, social, and economic multifunctionality, yet studies assessing its functions apply different classification categories and indicators, and no integrated standard exists. Korea's current classification also rests on physical attributes such as area and service radius, so it does not reflect the functional character of green spaces or include informal green spaces. This study derived an integrated indicator framework by synthesizing existing function–indicator systems, as a foundation for function-based classification. Following PRISMA 2020, 247 articles were selected from Web of Science and Scopus. Standardizing 1,915 function–indicator links yielded 24 functions and 23 measurement domains. Ward's hierarchical clustering was applied to the function × indicator matrix, producing six functional groups and one meta-axis. A bootstrap consensus analysis with 1,000 resamples showed high cohesion for F4 and F6 but low cohesion for F1, so F1 was treated as an interpretive group defined by conceptual commonality. When mapped to CICES, about 80% of the links corresponded to existing classes. The remaining 20% fell into dimensions that CICES does not count as services, such as ecological condition, use and equity, and social relations. This share reflects the gap between what the assessment literature measures and the scope of the classification, not omissions in CICES. Indicators were divided into core and supplementary indicators following the cascade model and weighted using TF-IDF. By using indicators as the organizing principle, this study integrates dispersed assessment practices and provides a basis for function-based typology independent of statutory categories.

†이 논문은 서울대학교 환경계획연구소의 지원을 받았음.
본 연구는 문헌 선별 과정에서 대규모 언어모델(Claude, Anthropic)을 보조 도구로 활용하였으며, 모든 판단의 최종 결정은 저자가 수행하였음.

Keywords: Ecosystem Services, Multifunctionality, Green Infrastructure Planning, Environmental Justice

1. 서론

1.1 연구 배경

도시녹지는 도시 생태계의 핵심 구성요소로서 생태적 · 사회적 · 경제적 측면의 다양한 기능을 동시에 제공하며, 도시민의 삶의 질 향상과 지속가능한 도시 발전에 기여한다(Bolund and Hunhammar, 1999; Gómez-Baggethun and Barton, 2013). 이러한 다기능성은 도시녹지의 본질적 특성으로, 하나의 녹지가 여러 생태계서비스를 중첩적으로 공급한다는 점에서 자연 생태계와 구별되는 도시 특유의 계획적 의미를 지닌다(Hansen and Pauleit, 2014). 특히 기후위기 대응 과정에서 그린인프라와 자연기반해법이 도시계획의 핵심 수단으로 부상하고 있다. 이에 따라 도시녹지를 개별 공간 단위가 아닌 연결된 인프라 체계로 이해하고 그 기능을 정량적으로 평가 · 관리하려는 요구가 확대되고 있다(Benedict and McMahon, 2006; Tzoulas et al., 2007; Kabisch et al., 2016).

도시녹지의 기능을 체계화하는 개념적 틀로는 생태계서비스가 널리 활용되어 왔다. 생태계서비스는 자연이 인간에게 제공하는 편익을 조직화하는 개념으로 정립되어 왔으며(Costanza et al., 1997; MEA, 2005), 도시녹지 연구에서도 대기정화 · 미기후조절 · 소음저감 · 우수조절과 같은 조절 기능부터 휴양 · 경관 · 교육 등 문화적 기능에 이르기까지 도시녹지가 제공하는 다양한 편익을 포착하는 준거 틀로 채택되어 왔다(Bolund and Hunhammar, 1999; Elmqvist et al., 2015). 그중 대표적 분류 틀인 MEA(millennium ecosystem assessment, 2005)는 생태계서비스를 공급 · 조절 · 문화 · 지지 서비스로 구분하였으며, 이후 도시녹지의 기능 평가 연구는 이 분류 체계를 준거로 삼아 진행되어 왔다.

그러나 생태계서비스 분류 체계는 도시녹지 평가에 그대로 적용하기에는 몇 가지 한계를 내포한다. 첫째, 지지서비스(supporting services)는 다른 서비스를 떠받치는 기반 과정이어서, 최종 편익과 함께 계산될 경우 이중계산(double counting) 문제를 유발한다(Fisher et al., 2009). 이에 TEEB(The Economics of Ecosystems and Biodiversity)와 CICES(Common International Classification of Ecosystem Services)는 지지서비스를 별도 범주에서 제외하고 최종 서비스 중심으로 분류를 재편하였다(Haines-Young and Potschin-Young, 2018). 둘째, 이러한 논의의 개념적 토대인 캐스케이드 모델은 생태계의 구조 · 과정에서 기능, 서비스, 편익, 가치로 이어지는 연쇄를 제시함으로써, 평가의 측정 대상이 '구조'인지 '기능 · 서비스'인지를 명확히 구분할 것을 요구한다(de Groot et al., 2002; Haines-Young and Potschin, 2010; Dick et al., 2017). 셋째, 이들 분류 틀은 본래 자연 생태계를 전제로 설계되어 접근성 · 형평성 · 사회적 상호작용 등 도시 특유의 이용적 · 사회적 기능을 충분히 포괄하지 못한다는 한계가 지속적으로 지적되어 왔다(Gómez-Baggethun and Barton, 2013; Wolch et al., 2014). 그 결과 도시녹지의 기능을 평가하는 연구는 다수 축적되었음에도(Haase et al., 2014), 적용하는 분류 범주와 지표가 연구마다 상이하여 결과를 상호 비교하거나 통합할 수 있는 공통 기준은 여전히 부재하다(de Groot et al., 2010).

이러한 정합성의 문제는 기능 · 서비스를 개념적으로 범주화하는 차원에 국한되지 않으며, 녹지를 하나의 공간 단위로 유형화하는 제도적 분류 체계에서도 유사하게 나타난다. 한국의 도시녹지는 「도시공원 및 녹지 등에 관한 법률」에 따라 소공원 · 어린이공원 · 근린공원 · 주제공원 · 완충녹지 · 연결녹지 등으로 분류되며, 그 기준은 주로 면적과 유치거리 등 공간의 물리적 속성에 기반한다(황해권과 손용훈, 2026). 그러나 동일한 형태 유형에 속하는 녹지라 하더라도 수목 피복과 식생 구조, 주변 토지이용에 따라 실제로 수행하는 기능은 상이할 수 있어, 물리적 속성에 기반한 분류는 녹지의 기능적 성격을 반영하지 못한다. 또한 현행 분류는 도시계획시설로 결정 · 고시된 도시공원과 법정 녹지를 대상으로 하므로, 하천 · 수변 식생, 가로수, 나지 등 비공식 녹지(informal green space)가 법정 범주에 포섭되지 못한다(Rupprecht and Byrne, 2014). 비공식 녹지는 도시 내에서 상당한 면적을 차지하며 휴양 · 생물다양성 지원 등 실질적 기능을 수행함에도 제도적 관리와 평가의 사각지대에 놓여 있다. 요컨대 생태계서비스 분류 틀은 '기능 · 서비스를 무엇으로 규정할 것인가'의 차원에서, 법정 분류체계는 '녹지를 어떤 공간 단위로 나눌 것인가'의 차원에서 각기 도시녹지의 기능적 실체와 어긋나 있다. 두 접근은 공통적으로, 녹지와 그 기능 간의 관계를 측정 가능한 형태로 매개하지 못한다.

이러한 문제의식과 관련하여 국내 선행연구는 도시녹지의 유형과 기능을 주로 두 흐름으로 다루어 왔다. 하나는 녹지의 형태 · 공간적 속성을 기준으로 유형을 구분하고, 이에 따른 이용 특성이나 제도적 체계를 분석하는 접근이다. 김예성 등(2014)은 도시녹지를 형태 유형별로 구분하여 유형에 따른 도시민의 이용 특성 차이를 규명하였으며, 황해권과 손용훈(2026)은 한국 · 일본 · 싱가포르 · 영국의 도시녹지 관련 법령을 비교하여 한국의 분류가 면적 · 유치거리 중심의 물리적 기준에 치우쳐 있음을 지적하였다. 이들 연구는 녹지 유형의 구분과 제도적 한계를 밝히는 데 기여하

였으나, 각 유형이 실제로 어떤 기능을 수행하는지를 지표 수준에서 규명하는 데까지 나아가지는 못하였다.

또 다른 흐름은 기존 생태계서비스 분류체계를 준거로 도시녹지의 평가지표를 개발하는 접근이다. 김은영 등(2017)은 MEA의 공급·조절·지지·문화 서비스 범주를 토대로 전문가 델파이 조사를 통해 도시공원의 생태계서비스 평가항목과 지표를 도출하고, 이를 수원시 사례에 시범 적용하였다. 이 접근은 평가지표를 체계적으로 정립하였다는 점에서 의의가 있으나, 사전에 규정된 분류 틀에서 출발하고 평가 대상을 도시공원이라는 단일 유형에 한정하며 지표 선정을 소수 전문가의 판단에 의존한다는 점에서, 다양한 녹지 유형에 축적된 실제 측정 관행 전반을 포괄하는 데에는 한계가 있다.

이러한 한계는 폭염·도시열섬, 홍수, 탄소중립 등 기후위기 대응과 그린인프라·생태계서비스 기반 계획이 요구되는 오늘날 더욱 두드러진다. 물리적 속성에 기반한 분류만으로는 '어떤 녹지가 어떤 환경 기능을 어느 정도 수행하는가'를 판단하고 정책적으로 우선순위화하기 어렵기 때문이다. 따라서 도시녹지 평가의 실질적 과제는 기능 자체의 개념을 새로 정의하는 데 있다기보다, 각 기능이 어떤 지표로 측정되어 왔는지를 체계화하는 데 있다. 다만 앞서 제시한 한국의 법정 분류와 비공식 녹지 문제는 본 연구의 분석 대상이라기보다, 물리적·형태적 분류가 녹지의 기능적 실체를 반영하지 못한다는 점을 드러내는 예시이다. 이 문제에 답하는 기능-지표 체계는 특정 제도에 국한되지 않는 측정 관행 전반에서 귀납되어야 재현성과 포괄성을 확보할 수 있으므로, 본 연구는 국내적 문제의식을 출발점으로 삼되 그 해법의 토대는 국제 학술 문헌에서 구한다. 이에 본 연구는 사전에 규정된 분류 틀에서 기능을 연역하는 대신, 다수 문헌에서 실제로 사용된 지표를 조직 원리로 삼아 기능을 귀납적으로 도출하고자 한다. 분석 대상은 도시공원 등 특정 유형에 한정하지 않고, 그린인프라·도시숲·비공식 녹지를 포함한 다양한 도시녹지 연구를 포괄한다. 나아가 사례 적용이나 전문가 델파이에 의존하는 방식과 달리, 체계적 문헌고찰과 지표-기능 동시출현의 정량 분석을 통해 분산된 평가 관행을 사후적으로 수렴하는 통합 지표 프레임워크를 제시하고자 한다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 도시녹지를 기능 단위로 분류하기 위한 토대로서, 기존 연구에서 활용된 지표와 기능의 대응관계를 체계적으로 고찰·통합하여 통합 지표 프레임워크를 도출하는 데 있다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 도시녹지 평가에 사용되어 온 지표를 종합적으로 수집·정리한다. 그간 개별 연구에서 선택적으로 활용되어 온 지표들을 한데 모아, 도시녹지의 기능이 실제로 어떤 지표를 통해 측정되어 왔는지를 포괄적으로 파악한다.

둘째, 수집된 지표를 바탕으로 도시녹지의 핵심 기능을 통합하여 귀납적 표준 기능 분류 체계를 도출한다. 기능과 지표의 대응 관계를 정리함으로써 기능별 측정의 실체를 규명하고, 이를 기존 생태계서비스 분류 체계와 대응시켜, 양자가 대응하는 영역과 대응하지 않는 영역을 함께 밝히고 그 불일치가 어느 축에서 어느 정도 규모로 발생하는지를 특정한다.

셋째, 도출된 기능-지표 체계를 향후 기능 기반 도시녹지 유형화가 근거로 삼을 수 있는 기초 자료로 구축한다. 본 연구의 범위는 유형화 자체의 수행이 아니라 그 선행 토대인 기능-지표 체계의 구축에 있으며, 법정 유형과 무관하게 적용 가능한 기능 기반 평가의 토대를 마련하여 물리적 속성에 기반한 현행 분류 체계를 보완할 자료로서의 활용 가능성을 제시한다.

2. 연구 방법

2.1 연구 대상

2.1.1 체계적 문헌고찰의 적용과 검색 데이터베이스

본 연구는 도시녹지의 기능을 평가하는 데 활용된 지표를 종합적으로 수집·표준화하고, 이를 바탕으로 기능-지표 대응 체계를 귀납적으로 도출하는 것을 목적으로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 특정 연구자나 학파의 시각에 편중되지 않고 관련 학술 문헌 전반에서 축적된 평가 관행을 포괄적·재현적으로 수집할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 명시적이고 재현 가능한 절차에 따라 문헌을 수집·선별하는 체계적 문헌고찰을 연구 방법으로 채택하였으며, 문헌의 식별·선별·적격성 평가·포함의 전 과정은 PRISMA 2020(preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses) 절차를 준용하여 수행하였다(Page et al., 2021).

문헌 검색은 국제적으로 대표성이 인정되는 학술 인용 데이터베이스인 WoS(Web of Science)와 Scopus를 활용하였다. 두 데이터베이스는 상호 보완적인 저널 수록 범위를 가지며, 학술논문을 중심으로 인용 색인을 제공한다는 점에서 문헌의 질적 신뢰성과 검색의 재현성을 동시에 확보할 수 있다(Singh et al., 2021). 단일 데이터베이스에

의존할 경우 특정 분야·지역의 문헌이 체계적으로 누락될 수 있으므로, 두 데이터베이스를 병용하여 수록 편향을 완화하고 대상 문헌의 포괄성을 높이고자 하였다.

2.1.2 검색식 구성 및 검색 범위

검색식은 본 연구의 분석 초점인 '연구 대상(도시녹지)', '연구 주제(기능 및 생태계서비스)', '분석 방법(지표 기반 평가)'의 세 개념 군으로 구성하였다. 각 개념 군 내부에서는 동일 개념을 지칭하는 다양한 용어를 OR 연산자로 결합하여 검색 민감도를 확보하고, 세 개념 군은 AND 연산자로 결합하여 세 요소를 동시에 다루는 문헌으로 검색 특이도를 확보하였다(표 1 참조). 이러한 3축 결합 방식은 '도시녹지의 기능을 지표로 평가한 연구'라는 본 연구의 대상 조건을 검색식 수준에서 조작적으로 구현하기 위한 것이다. 검색식은 Web of Science에서는 Topic 필드(TS; 제목·초록·저자 키워드·Keywords Plus)에, Scopus에서는 이에 대응하는 TITLE-ABS-KEY 필드(제목·초록·키워드)에 적용하였다. 두 데이터베이스는 검색 필드 구성이 유사하나, Web of Science의 Keywords Plus는 인용문헌에서 자동 생성되는 색인어로서 Scopus에 대응 항목이 없어, 동일 검색식에서도 Web of Science의 검색 결과가 상대적으로 넓게 산출될 수 있다.

검색 대상 언어는 영어로, 문헌 유형은 학술논문으로 한정하였다. 검색 기간은 2005년부터 2025년까지로 설정하였는데, 그 기점을 2005년으로 둔 것은 생태계서비스 개념을 정책·평가 영역으로 본격 확산시킨 MEA가 2005년에 발표되었고(MEA, 2005), 이를 계기로 생태계서비스 프레임을 활용한 도시녹지 기능 평가 연구가 본격화되었다고 판단하였기 때문이다. 각 문헌에 대해서는 후속 선별 및 분석에 필요한 서지 정보로서 문헌번호, 저자, 제목, 출판연도, DOI, 초록, 저자 키워드를 추출하였다.

2.2 연구 흐름

본 연구의 전체 흐름은 크게 세 단계로 구성된다. 첫째, PRISMA 절차에 따른 문헌 선별을 통해 최종 분석 대상 문헌을 확정한다. 둘째, 확정된 문헌에서 기능과 지표를 추출하고 이를 표준화하여 분석 가능한 구조화 데이터로 재구성한다. 셋째, 기능-지표 동시출현 구조에 대한 군집분석과 검증을 수행하여 기능군을 도출하고, 기존 분류체계와의 정합성을 평가한 뒤 지표별 가중치를 산정한다.

2.2.1 문헌 선별 과정

문헌 선별은 식별(identification), 선별(screening), 적격성 평가(eligibility), 포함(included)의 네 단계로 수행하였다(그림 1 참조).

표 1. 개념 군별 검색어 및 최종 검색식

개념 군	검색어
개념1: 도시녹지	"urban green space*" OR "urban greenspace*" OR "urban park*" OR "urban forest*" OR "green infrastructure" OR "urban vegetation"
개념2: 기능	"ecosystem service*" OR "function*" OR "benefit*" OR "green space service*" OR "multifunctional*"
개념3: 지표	"indicator*" OR "metric*" OR "index" OR "indices" OR "assess*" OR "evaluate*" OR "measure*"
최종 검색식	(개념1) AND (개념2) AND (개념3)

*절단검색을 의미하며, 어간 이후 변화형을 포괄함(예: assess → assess, assessment, assessing)

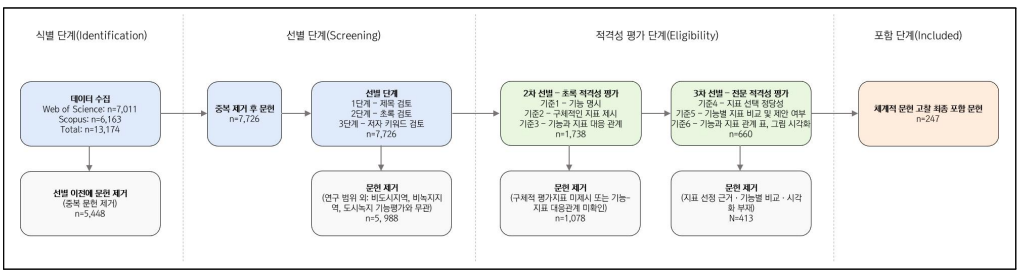


그림 1. PRISMA 문헌 선별 흐름도

식별 단계에서는 Web of Science 7,011편, Scopus 6,163편으로 총 13,174편이 검색되었다. 검색 시점에 따른 수록 문헌의 변동을 통제하기 위해 두 데이터베이스에 대한 검색을 2026년 02월에 동일자로 수행하였다. 검색 결과를 서지관리도구(Zotero)로 통합한 뒤, DOI 및 제목·저자·출판연도를 기준으로 중복을 식별하여 5,448편을 제거하고 7,726편을 확보하였다. 여기서 유의할 점은, 식별 단계의 검색이 지정 필드(WoS의 TS, Scopus의 TITLE-ABS-KEY) 내 검색어의 출현 여부에 기반한 기계적 매칭이라는 것이다. 검색은 재현 가능한 절차로 관련 문헌을 누락 없이 포착하는 데 목적을 두므로, 검색어가 본문의 부수적 맥락에서 언급되었을 뿐 실제로는 도시녹지의 기능·지표를 다루지 않는 문헌이 다수 포함된다. 따라서 이어지는 선별은 검색을 반복하는 절차가 아니라, 포착된 서지 레코드를 실제로 판독하여 주제 적합성과 적격성을 연구자가 판단하는 해석적 절차로 구분된다.

1차 선별(선별 단계, screening)은 확보된 7,726편의 제목·초록·저자 키워드를 판독하여 연구 범위와의 주제 적합성을 판정하는 단계로, 개별 포함 기준을 적용하기 이전의 광의의 범위 판정에 해당한다. 먼저 제목을 통해 도시녹지·기능·지표 중 어느 하나도 다루지 않음이 명백한 문헌을 제외하고, 제목만으로 판단이 유보되는 문헌은 초록을 읽어 기능 평가 또는 지표 측정이 연구의 주제가 아닌 경우를 제외하였으며, 제목·초록만으로 주제를 특정하기 어려운 경우에 한하여 저자 키워드를 보조적으로 참조하였다. 그 결과 비도시 지역, 비녹지 대상, 기능·지표 부재, 특정 식물종 대상 연구 등 명백한 범위 외 문헌 5,988편을 제외하여 1,738편을 확보하였다. 한편 1차 선별의 대상 문헌량이 방대하여 단일 연구자가 전량을 판독하기 어려운 점을 고려하여, 3인의 연구자가 레코드를 분담·할당하여 수행하였다. 이 과정에서 대규모 언어모델(Claude, Opus 4.5, Anthropic)을 보조 도구로 활용하였는데, 각 레코드의 제목·초록에 대해 사전 적합성 라벨(포함 후보/제외 후보)과 판단 근거를 생성하도록 하여 연구자의 판독을 지원하는 용도로 한정하였다. 포함·제외의 최종 판정은 전적으로 연구자가 수행하였으며, 모델이 제시한 라벨은 참고 정보로만 사용하였다.

초록 기반의 2차 선별과 전문 기반의 3차 선별로 세분하여 총 6개의 기준을 적용하였다(적격성 평가 단계, Eligibility). 2차 선별에서는 초록을 대상으로 기준1(도시녹지의 기능이 명시적으로 다루어지는가), 기준2(구체적인 평가 지표가 제시되는가), 기준3(기능과 지표 간의 대응 관계가 초록에서 확인되는가)를 적용하여 1,078편을 제외하고 660편을 확보하였다. 3차 선별에서는 전문을 대상으로 기준4(연구 방법에서 지표 선택의 정당화가 기술되는가), 기준5(결과 또는 논의에서 기능별 지표 비교 또는 지표체계 제안이 명시되는가), 기준6(기능-지표 대응 관계가 표 또는 그림으로 시각화되는가)를 적용하여 413편을 제외하였다. 최종적으로 6개 기준을 모두 충족한 247편을 포함 단계의 분석 대상 문헌으로 확정하였다.

2.2.2 기능-지표 추출 및 표준화

확정된 247편을 대상으로 도시녹지의 기능을 평가하는 데 사용된 지표와 해당 지표가 측정하는 기능을 문헌 단위로 추출하였으며, 그 결과 총 1,915개 행(기능-지표 조합)의 원자료를 구축하였다. 추출 항목은 원문에서 그대로 발췌한 지표명(raw indicator)과 저자가 부여한 기능 명칭(author function label)을 포함한다.

원자료에는 '나무 수관 피복', '수관 피복', '수관피복률'과 같이 의미는 유사하나 표기가 상이한 지표, 그리고 '탄소저장에 따른 기후변화'와 '기후변화 및 완화'와 같이 표기는 다르나 실질적으로 동일한 기능을 지칭하는 사례가 다수 존재하였다. 이러한 표기 이질성을 그대로 두면 후속 동시출현 분석 단계에서 동일 개념이 복수의 범주로 분산되어 분석의 일관성과 해석 타당성이 저하될 수 있다. 이에 연구자는 의미 유사성을 기준으로 지표와 기능을 대표어로 통합하는 표준화 과정을 수행하였다. 그 결과 지표는 73개의 대표어로 정리한 뒤, 개수가 여전히 많아 해석의 가독성을 확보하기 어려운 점을 고려하여 측정 대상의 성격에 따라 23개의 지표 측정도메인으로 차원을 축소하였으며, 기능은 24개의 대표어로 통합하였다(표 2 참조). 표 2는 전체 1,915건의 기능-지표 연결을 대상으로 수행한 표준화 과정의 대표 사례이며, 모든 연결은 기존 문헌에서 사용된 기능명과 측정지표를 근거로 동일한 기준에

표 2. 기능-지표 추출 및 표준화 예시

논문 번호	지표명	지표 대표어	지표 측정도메인	저자가 부여한 기능	기능 대표어
P003	지상부 생체량	생체량	식생구조	탄소저장에 따른 기후변화	탄소격리·기후변화 완화
P003	CO_2 흡수량	탄소격리·흡수량	탄소	기후변화 및 완화	탄소격리·기후변화 완화
P020	수관 피복	수관피복률	식생구조	도시 열 쾌적성 유지	열섬완화·미기후조절
P024	수목 피복률	수관피복률	식생구조	자연성 및 생물다양성	서식지제공·생물다양성
P015	공원 접근성	접근성	접근성·사회	신체적 경관 이용	휴양·여가

따라 저자가 직접 검토·표준화하였다.

한편, 본 연구에서 사용하는 기능은 생태계서비스 캐스케이드가 규정하는 협의의 생태적 기능에 국한되지 않는다. 표준화 과정에서 도출된 24개 기능 대표어에는 탄소격리·미기후조절과 같이 생태계의 구조·과정에서 비롯되는 전통적 기능뿐 아니라, 녹지공급·접근성·형평성이나 회복력·지속가능성·다기능성과 같이 엄밀한 의미에서 생태적 기능으로 보기 어려운 항목도 포함된다. 이들은 생태계가 수행하는 과정이라기보다 녹지의 이용 가능성, 생태적 상태, 또는 여러 기능을 가로지르는 통합적 평가 속성에 가깝다. 그럼에도 이를 배제하지 않고 분석 단위에 포함한 것은, 본 연구가 '기능을 어떻게 개념적으로 정의할 것인가'가 아니라 '도시녹지 평가에서 실제로 무엇이 측정 대상이 되어 왔는가'를 조직 원리로 삼기 때문이다. 따라서 본 연구에서 기능은 도시녹지 평가에서 측정의 대상이 되는 기능적 평가 차원을 포괄하는 조작적 개념으로 규정하며, 전통적 생태 기능뿐 아니라 생태적 상태, 이용·접근 차원, 횡단적 통합 축을 함께 아우른다.

다만 이러한 확장은 연구자가 특정 항목을 선별적으로 추가한 결과가 아니라, 추출 규칙을 일관되게 적용한 결과이다. 본 연구의 추출 단위는 '저자가 도시녹지의 기능으로 라벨링하고 이를 측정하는 지표를 대응시킨 항목'이며, 따라서 포함 여부의 판단 기준은 해당 항목이 생태적 기능의 정의에 부합하는가가 아니라 문헌이 이를 평가 대상으로 다루었는가에 있다. 이 규칙에 따라 특정 분류체계가 서비스로 계상하지 않는 항목이라도 문헌에서 측정 대상으로 다루어졌다면 그대로 분석 단위에 포함하였다. 만약 특정 분류체계의 범위를 기준으로 자료를 사전에 취사선택한다면, 그 분류체계가 전제하는 범위가 자료에 그대로 각인되어 관행의 실태 자체를 관측할 수 없게 되기 때문이다. 이로써 본 연구의 24개 기능은 CICES를 비롯한 어떤 분류체계의 범주 구성과도 독립적으로 결정되며, 후술하는 CICES 대응은 문헌에서 관측된 기능–지표 사용 양상에 기초해 도출한 본 체계와 CICES 분류 체계를 비교하여 두 체계의 대응 범위와 차이를 확인하는 절차에 해당한다.

2.2.3 기능–지표 동시출현 행렬 구성

표준화된 기능–지표 데이터를 기능(24개) × 지표 측정도메인(23개)의 동시출현 행렬로 집계하였다. 최종 선정된 247편에서 추출·표준화한 기능–지표 연결을 대상으로 하였으며, 행렬의 각 셀은 해당 기능이 특정 측정도메인의 지표와 함께 사용된 연결 빈도로, 전체 연결은 1,915건이다. 이때 기능별 출현 빈도의 절대적 크기 차이가 유사도 산정에 개입하는 것을 방지하기 위해 각 행을 행 합으로 정규화하여, 각 기능이 '어떤 지표로 측정되는가'라는 상대적 지표 사용 양상을 구성하였다.

이처럼 기능과 지표의 공동 출현 구조를 행렬로 요약하는 접근은, 다수의 생태계서비스가 함께 나타나는 연관 구조(번들, bundle)를 정량화하는 방법론에 기반을 둔다(Raudsepp-Hearne et al., 2010; Mouchet et al., 2014). 본 연구에서는 이 원리를 '서비스 간' 축이 아닌 '기능–지표' 축으로 전환하여 분석 틀로 활용하였다.

이어 각 지표를 생태계서비스 캐스케이드 모델(생태계의 구조–과정–서비스)에 따라 구분하여(de Groot et al., 2002; Potschin-Young et al., 2018), 기능의 서비스 측면을 직접 측정하는 지표를 핵심지표로, 구조·맥락을 대리 측정하는 지표를 보조지표로 분리하였다. 이는 평가의 측정 대상이 '구조'인지 '기능·서비스'인지를 지표 수준에서 명시적으로 구분하기 위한 것이다.

2.2.4 위계적 군집분석과 배정 규칙을 통한 기능군 구성 및 통계적 안정성 검증 방법

앞서 구성한 각 기능의 지표 사용 양상을 바탕으로, 기능 간 비유사성을 지표 사용 양상 벡터 간의 유클리드 거리로 정의하고 Ward 연결법 기반의 위계적 군집분석(Ward, 1963)을 적용하여 덴드로그램을 산출하였다. Ward 연결법은 군집 내 분산의 증가를 최소화하는 방향으로 병합하므로, 지표 사용 양상이 유사한 기능들을 응집력 있게 묶는 데 적합하다. 덴드로그램상의 측정 양상 골격을 기능군 구성의 1차 근거로 삼되, 각 기능의 최종 배정은 다음의 위계적 규칙에 따라 확정하였다. 첫째, 군집–범주 규정 단계에서, $k = 7$ 수준에서 절단한 각 군집을 고유하게 수렴하는 지표군의 유무에 따라 구분하여, 특정 지표군으로 수렴하는 여섯 군집은 최종 기능군(F1–F6)으로, 하나의 군집으로 응집하지 않고 각기 다른 계열로 분산되는 기능의 경우에는 병렬적 기능군이 아닌 횡단·통합 평가축(M)으로 규정하였다. 둘째, 개별 기능의 배정 조정 단계에서, 단일 절단에서의 위치가 배정 기능군과 어긋나는 기능에 대해서는 부트스트랩 컨센서스에서의 동시군집 안정성을 1차 근거로 적용하여, 특정 기능군과 군집 내 컨센서스 수준으로 안정적으로 동시군집되는 경우 그 기능군에 배정하였다. 단일 절단과 컨센서스 모두에서 특정 기능군과의 결합이 약한 경우에 한하여, 측정 유사성이 아니라 해당 기능이 조절·지지하는 대상의 개념적 공통성을 근거로 배정하되, 그 배정이 측정 근거가 아닌 개념적 근거에 의한 것임을 명시하였다. 이처럼 덴드로그램은 측정 양상의 골격을 제공할 뿐 단일 절단 수준으로 모든 기능이 명확히 분리되지는 않으므로, 본 연구의 기능군은 절대적 경

계를 갖는 경성 군집이 아니라 위 규칙에 따라 측정 근거와 개념적 근거를 함께 반영한 해석적 분류로 규정한다.

위 규칙에 따라 구성한 기능군이 표본 구성의 우연에 좌우되지 않는지, 그리고 개별 기능의 배정이 표본에 걸쳐 안정적인지를 확인하기 위해 컨센서스 군집 기반의 부트스트랩 재표집을 수행하였다(Monti et al., 2003). 분석 대상 문헌 247편을 복원추출하여 동일 크기의 표본을 1,000회 생성하고, 매 표본마다 앞선 절차(지표 사용 양상 구성–유클리드 거리–Ward 연결법–k = 7 절단)와 동일하게 군집을 재형성하였다. 이후 임의의 두 기능이 동일 군집으로 묶이는 빈도의 비율을 동시군집 비율로 산출하여 컨센서스 행렬을 구성하고, 같은 기능군 내 기능 쌍의 평균 동시군집 비율(군집 내 컨센서스)과 상이한 기능군 간 쌍의 평균(군집 간 컨센서스)을 비교하는 절차를 설계하였다. 이때 군집 내 컨센서스는 최종 기능군(F1–F6)에 배정된 기능 쌍만을 대상으로 산정하였으며, 독립 군집을 형성하지 않는 M의 세 기능은 그 내부 동시군집 비율을 별도로 보고하였다. 아울러 행 정규화 자료의 조성적 성격을 고려한 거리 정의 민감도 분석(Hellinger 변환)과 군집 수 결정을 위한 실루엣 계수 검토를 수행하였으며, 그 결과는 부록 1에 제시하였다. 군집 수는 실루엣 계수를 병행 검토하였으며, k = 7은 도시녹지 평가에 필요한 기능적 해상도를 확보하기 위한 분석적 절단 수준으로 채택하였다(부록 1.2 참조).

2.2.5 기존 분류체계와의 정합성 평가

귀납적으로 도출한 24개 기능을 국제 표준 생태계서비스 분류체계인 CICES에 사후 대응시켜, 문헌에서 관측된 기능–지표 연결이 기존 분류체계의 클래스에 대응하는 범위와 대응하지 않는 범위를 함께 확인하였다. 이 대응의 목적은 본 연구의 체계를 CICES에 비추어 타당성을 검증하거나, 반대로 CICES의 포괄성을 평가하는 데 있지 않다. 두 체계는 지향하는 목적이 다르기 때문이다. CICES는 생태계가 제공하는 최종 생태계서비스를 중심으로 구성된 분류체계로서, 생태계 상태·가치·비서비스를 설계 원칙상 서비스 범주에 포함하지 않는다(Boyd and Banzhaf, 2007; Fisher et al., 2009). 반면 본 연구의 체계는 도시녹지 평가 문헌에서 기능과 지표가 어떻게 연결되어 측정되어 왔는지를 보여 주는 문헌 기반 기능–지표 체계이다. 따라서 대응 분석의 산출물은 어느 체계가 더 완전한가의 판정이 아니라, 문헌에서 실제로 측정된 항목과 CICES의 최종 생태계서비스 중심 분류 범위 사이의 차이가 어느 축에서 어느 정도 나타나는지를 확인하는 데 있다. 비교 분석을 위해서 현재 공개된 최신판인 CICES v5.2를 적용하였다(Haines-Young, 2023).

대응은 사후적으로 수행하였다. 즉 CICES를 기능 도출이나 군집 구성 단계에 개입시키지 않고, 문헌에서 관측된 기능–지표 연결만으로 체계를 확정한 뒤 그 결과물을 대조하였다. 이는 기존 분류체계가 기능 대표어 선정이나 군집 구성에 반영되어 대응 결과가 자기 충족적으로 산출되는 것을 차단하기 위한 설계이다. 다만 이 설계가 보장하는 것은 본 연구의 체계가 CICES와 독립적으로 구성되었다는 점이지, 대응 결과가 CICES에 대한 평가로 성립한다는 점이 아니다. 본 연구의 기능 정의는 문헌의 라벨링 관행을 따르므로 CICES가 설계상 배제하는 차원을 포함하며, 따라서 범위 밖 연결이 관측되는 것 자체는 예견된 결과이다. 대응 분석에서 정보가 되는 것은 범위 밖 연결이 존재하는가가 아니라, 그것이 전체 측정 노력에서 차지하는 비중이 얼마이며 어느 축에 집중되는가이다. 분석 단위는 기능이 아니라 기능–지표 연결(n = 1,915)로 설정하였는데, 기능 개수를 단위로 하면 각 기능이 문헌에서 차지하는 측정 비중이 동등하게 취급되는 반면(예: 열섬완화·미기후조절 n = 268과 수자원공급 n = 4가 동일한 1개로 계상), 연결 빈도를 단위로 하면 대응 비율이 문헌의 실제 측정 노력에 비례하기 때문이다. 다만 해석의 균형을 위해 기능 개수 기준 결과를 표기하였다.

2.2.6 기능별 평가 지표 가중치 산정

마지막으로, 산정된 기능–지표 체계를 실제 평가에 적용할 수 있도록 지표별 가중치를 산정하였다. 가중치는 문헌에서 실제 관측된 기능–지표 사용 빈도를 기반으로 하되, 특정 지표가 얼마나 자주 사용되는가(빈도)와 특정 기능에만 고유하게 사용되는가(고유성)를 함께 반영하는 TF-IDF(term frequency–inverse document frequency) 원리(Salton and Buckley, 1988)를 차용하였다. 이를 통해 녹지면적·NDVI와 같이 여러 기능에 두루 사용되는 범용 지표의 영향을 약화시켜 기능 간 변별력을 유지하고, 각 기능별로 핵심 및 보조 지표를 균등 기대 비중 기준으로 기능당 3–7개를 선정하여 체계를 단순화하였다. 이로써 (가중치 × 지표 측정값)의 가중 합으로 기능 점수를 산출할 수 있는 기능 기반 평가 지표 체계를 구성하였다.

3. 연구 결과

3.1 출판 연도별 문헌 분포와 연구 동향

체계적 문헌 고찰의 검색 기간은 2005년부터 2025년까지로 설정하였으나, 3차에 걸친 선별을 통해 최종 분석에

포함된 247편의 논문은 2011년부터 2026년(early access 문헌 포함)에 걸쳐 분포하였다(그림 2 참조). 검색 시작 시점인 2005년과 최종 분석에 포함된 문헌 중 최초 문헌이 출판된 2011년 사이에는 약 6년의 차이가 확인되는데, 이는 MEA를 통해 생태계서비스 개념이 정립된 이후, 해당 개념이 도시녹지의 기능을 실제로 측정하는 지표 수준의 연구로 조작화되어 학술적으로 축적되기까지 필요한 개념적·물리적 확산 시간을 반영한 결과로 판단된다. 즉, 개념적 프레임의 등장과 그것을 활용한 실증적 평가 연구의 본격화 사이에는 물리적인 시간이 존재하며, 본 연구의 문헌 분포는 이러한 상황을 반영하고 있다.

연도별 문헌량은 전반적으로 우상향하는 증가 추세를 보였으며, 이를 변화 양상에 따라 도입기(2011–2016), 성장기(2017–2020), 가속기(2021–2026, early access 1편 포함)의 세 국면으로 구분할 수 있다. 도입기에는 연간 1–6편 수준에 머물러 총 17편(6.9%)에 불과하였으며, 이 시기의 연구는 생태계서비스 프레임을 도시 맥락에 적용하려는 초기의 탐색적 시도로 이해된다. 이후 2016년 6편에서 2017년 14편으로 문헌량이 2배 이상 증가하며 뚜렷한 변곡점이 형성되었고, 성장기에는 연간 14–18편 수준을 유지하며 총 65편(26.3%)이 산출되었다. 가속기에는 증가세가 더 가팔라져 총 165편(66.8%)이 집중되었으며, 특히 2025년에는 단일 연도 최대치인 54편이 출판되어 연구 관심이 정점에 이르지 않고 지속적으로 확대되고 있음을 보여준다.

전체 문헌의 66.8%가 2021년 이후에 집중되어 있으며, 연평균 산출량이 증가하고 있는 추세이다. 이는 도시녹지의 기능 및 생태계서비스에 대한 학술적 관심이 최근 급격히 고조되고 있음을 시사한다. 이러한 증가 추세는 여러 국제적 정책 의제와 시기적으로 맞물린다. 2015년 UN지속가능발전목표(SDGs)와 파리협정 채택을 계기로 도시 내 녹지 및 공공공간의 기능을 정량적으로 평가하려는 수요가 확산되었고, 자연기반해법(nature-based solutions, NbS)이 도시 정책 담론으로 주류화되면서 성장기의 문헌 증가에 영향을 미친 것으로 보인다. 이어 2020년 전후 COVID-19 팬데믹으로 도시민의 녹지 이용과 건강·사회적 편익에 대한 관심이 재조명되고, 2050 탄소중립 선언 등 기후위기 대응 의제가 본격화되면서 가속기의 급격한 문헌 증가로 이어진 것으로 해석할 수 있다. 이처럼 문헌량의 시계열적 변화는 도시녹지 기능 평가 연구가 독립적으로 전개되었다기보다, 세계적인 도시 정책 환경의 변화와 긴밀히 연동되고 있음을 시사한다.

3.2 도시녹지 기능–지표 체계 구축

3.2.1 도시녹지 기능–지표 동시출현 행렬 구성

동시출현 행렬을 집계한 결과, 각 기능은 서로 뚜렷이 구별되는 고유한 지표 사용 양상이 나타났다(그림 3 참조). 이는 도시녹지 평가에서 기능을 실질적으로 분별하는 원리가 '기능 개념의 정의'가 아니라 '어떤 지표로 그 기능을 측정하는가'에 있음을 시사한다. 이러한 결과는 생태계의 구조·과정에서 기능·서비스·편익·가치로 이어지는 캐스케이드 모델이 평가의 측정 대상(구조인가 기능·서비스인가)을 명시적으로 구분할 것을 요구한다는 논의(de Groot et al., 2002; Potschin-Young et al., 2018)와 정합적이다. 기능 간 지표 사용 양상을 정량적으로 요약하기 위해, 각 기능의 최빈 측정도메인이 차지하는 비중을 지배 지표 점유율(최빈 도메인 연결 수 ÷ 행 합)로 산출하였

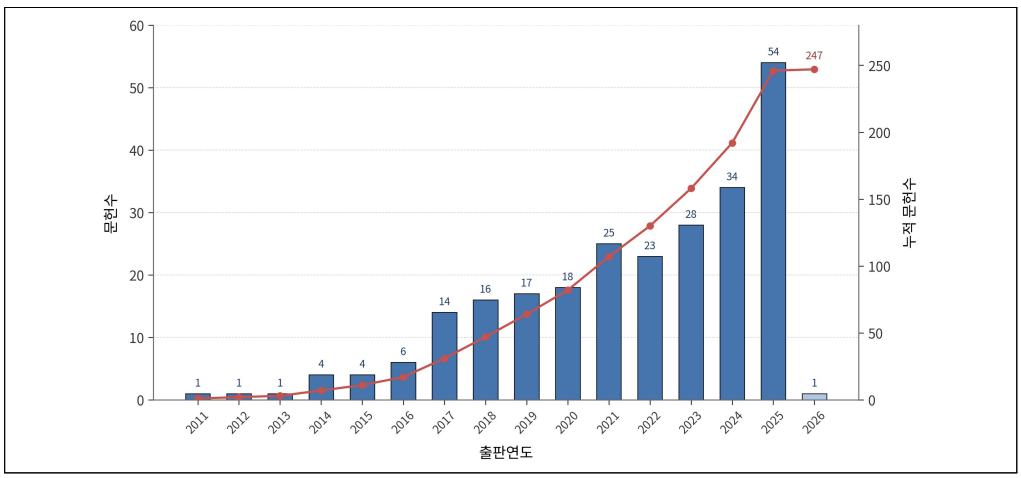


그림 2. 출판 연도별 수집 문헌 수

범례: 문헌수 누적

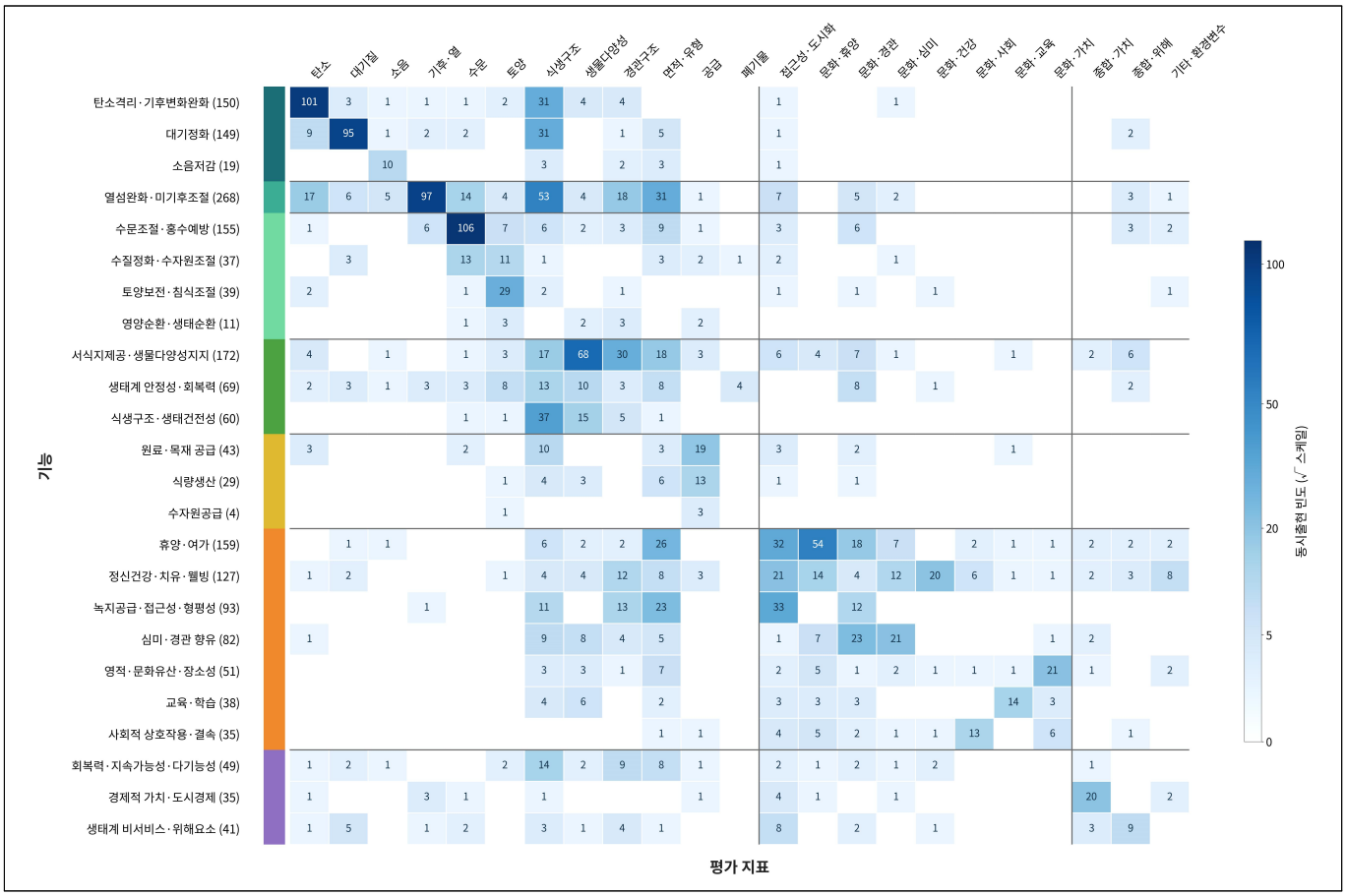


그림 3. 도시녹지 기능–평가 지표 동시출현 행렬

다. 이 값은 특정 기능이 단일 지표에 얼마나 의존하는지를 나타내는 집중도 지표로, 값이 클수록 소수의 직접 지표로 측정되는 기능을, 값이 작을수록 여러 지표로 분산 측정되는 기능을 의미한다.

생태계서비스 분류체계에서 조절서비스에 해당하는 탄소격리 · 기후변화완화, 대기정화, 수문조절 · 홍수예방, 토양보전 · 침식조절 등의 기능들은 각기 자신을 직접 측정하는 단일 지표에 강하게 수렴하는 양상을 보였다. 탄소격리 · 기후변화완화는 탄소 도메인(연결 101건, 점유율 67.3%)에, 대기정화는 대기질 도메인(95건, 63.8%)에, 수문조절 · 홍수예방은 수문 도메인(106건, 68.4%)에, 토양보전 · 침식조절은 토양 도메인(29건, 74.4%)에 집중되었다. 이는 해당 조절서비스와 관련한 기능들이 물리적 과정과 직결된 표준화된 생물리적 지표(예: 탄소 흡수 · 저장량, 대기오염물질 제거량, 우수유출 저감량, 토양 유실량)로 측정되고 있음을 의미한다. 다만 조절서비스와 관련한 기능에서도 식생구조 도메인(예: 엽면적지수, 수관피복률 등)이 탄소격리(31건)와 대기정화(31건)에 공통적으로 부수 지표로 등장한다는 점은 주목할 만하다. 이는 식생의 구조적 속성이 여러 조절기능의 대리지표로 광범위하게 차용됨을 보여주며, 캐스케이드 관점에서 '구조'를 측정하는 지표가 복수의 '기능' 평가에 걸쳐 사용되는 현상으로 해석된다.

열섬완화 · 미기후조절은 전체에서 가장 많은 연결(268건)을 보인 최다 연구 기능으로, 도시열섬과 폭염 대응이 도시녹지 연구의 핵심 의제로 부상해 온 흐름과 부합한다(Aram et al., 2019). 그러나 다른 조절서비스 관련 기능과 달리 기후 · 열 도메인의 점유율은 36.2%(97건)에 그쳤으며, 식생구조(53건) · 면적 · 유형(31건) · 경관구조(18건) · 탄소(17건) · 수문(14건) 등 다수 도메인을 폭넓게 함께 사용하였다. 이는 미기후조절이 단일 냉각 지표(지표면 온도 · 냉각효과)뿐 아니라 이를 유발하는 식생 · 공간 구조 지표를 병행하여 평가되는, 결과 지표와 구조 지표가 함께 동원되는 복합 측정 기능임을 보여준다.

기존의 지지서비스와 관련한 기능들은 생물다양성 · 식생구조 · 경관구조 등 생태적 상태를 기술하는 지표를 중심으로 측정되었다. 서식지제공 · 생물다양성지지는 생물다양성 도메인(68건, 39.5%)과 함께 경관구조(30건) · 면적 · 유형(18건) · 식생구조(17건)를 사용하였고, 식생구조 · 생태건전성은 식생구조 도메인(37건, 61.7%)에 집중되었다. 이들 지표는 서비스의 최종 편익이라기보다 생태계의 상태를 나타내는 성격이 강하며, 문헌에서는 이를 도시녹지 평가의 실질적 대상으로 다루고 있다. 이는 상태 차원이 기존 서비스 중심 분류에서 배제되어 온 점과 대비되어,

본 체계의 차별적 포착 영역을 예고한다.

공급서비스와 관련한 자원 공급 계열(원료 · 목재 공급, 식량생산, 수자원공급)은 공급 도메인을 핵심지표로 공유하되 연결 총량 자체가 작았다(각각 43 · 29 · 4건). 공급 도메인 점유율은 원료 · 목재 공급 44.2%, 식량생산 44.8%였으며, 수자원공급은 총 연결이 4건에 불과하여 75.0%로 나타났으나 표본이 작아 해석에 유의가 필요하다. 이는 도시녹지 맥락에서 공급서비스 연구가 제한적임을 보여준다.

문화서비스의 속성이 강한 기능들은 접근성 · 도시화 및 면적 · 유형이라는 공통 지표 기반을 광범위하게 공유하면서도, 문화 계열 세부 도메인을 통해 각자 고유한 기능으로 분화되는 이원적 구조를 보였다. 휴양 · 여가는 문화 · 휴양(54건) · 접근성(32건) · 면적 · 유형(26건)을, 녹지공급 · 접근성 · 형평성은 접근성(33건) · 면적 · 유형(23건)을, 심미 · 경관 향유는 문화 · 경관(23건) · 문화 · 심미(21건)를, 영적 · 문화유산 · 장소성은 문화 · 가치(21건)를, 교육 · 학습은 문화 · 교육(14건)을, 사회적 상호작용 · 결속은 문화 · 사회(13건)를 각각 지배 지표로 삼았다.

특히 정신건강 · 치유 · 웰빙은 접근성(21건) · 문화 · 건강(20건) · 문화 · 휴양(14건) · 문화 · 심미(12건) · 경관구조(12건)에 고르게 분산되어 지배 지표 점유율이 16.5%로 전체에서 가장 낮았다. 이는 문화적 · 사회적 기능이 고유한 직접 지표가 부족하여 접근성 · 면적 등 사회 · 공간적 대리 지표에 의존한다는 문화서비스 측정의 구조적 특성을 반영한다(Dickinson and Hobbs, 2017). 이 범주 전반에서 접근성 · 형평성이 핵심 공유 지표로 부상하는 것은 문화서비스가 발현되는 방식 자체에서 비롯된다. 조절 · 지지 기능이 인간의 이용 여부와 무관하게 생태계의 생물리적 과정을 통해 성립하는 것과 달리, 도시녹지가 제공하는 문화서비스와 문화적 가치는 이용자가 해당 녹지 공간을 직접 방문하고 이용하는 상호작용을 통해 비로소 실현되는 이용 의존적 성격을 지닌다(Kabisch and Haase, 2014). 즉 문화서비스의 편익은 잠재적 공급 역량만으로는 성립하지 않으며, 이용자가 공간에 도달하여 이를 사용할 수 있는 조건이 충족될 때 비로소 실제 편익 흐름으로 전환된다. 이 때문에 접근성과 그 분포의 형평성은 특정 문화 기능에 국한되지 않고 휴양 · 여가, 정신건강 · 치유, 심미 · 경관, 사회적 상호작용 등 문화 기능 전반에 걸쳐 공통적으로 측정되며, 실제로 본 행렬에서도 접근성 · 도시화 도메인이 문화서비스 관련 대부분의 기능에서 상위 공유 지표로 나타났다. 나아가 이는 접근성과 환경정의가 자연 생태계를 전제로 설계된 기존 분류가 충분히 포괄하지 못한 도시 특유의 평가 차원임을 실증하며(Wolch et al., 2014), 도시녹지 평가가 서비스의 생물리적 공급 역량뿐 아니라 이용자의 도달 · 이용 가능성과 그 사회적 분배까지 함께 고려해야 함을 시사한다.

회복력 · 지속가능성 · 다기능성, 경제적 가치, 생태계 비서비스 · 위해요소 기능들은 고유한 측정 지표를 갖추지 못한 채 여러 도메인에 분산되는 경향을 보였다. 회복력 · 지속가능성 · 다기능성은 식생구조(14건) · 경관구조(9건) · 면적 · 유형(8건) 등에 분산되어 지배 지표 점유율이 28.6%에 그쳤고, 생태계 비서비스 · 위해요소는 기타 · 환경변수(9건) · 접근성(8건) · 대기질(5건)로 가장 폭넓게 흩어졌다(22.0%). 이는 다기능성 · 비서비스가 특정 기능이라기보다 여러 기능을 가로지르는 평가축임을 지지하며, 도시녹지가 편익뿐 아니라 위해요소(disservice)를 동시에 발생시킨다는 논의와도 부합한다(Shackleton et al., 2016). 한편 경제적 가치 · 도시경제는 종합 · 가치 도메인에 집중되었으나(57.1%), 이 도메인 자체가 화폐가치 · 통합가치를 집계한 평가 결과 지표라는 점에서 여타 기능의 생물리적 지표와는 층위가 다르다.

앞서 도출한 동시출현 행렬을 바탕으로, 각 기능이 사용한 지표를 캐스케이드 모델에 따라 구분하여 기능의 서비스 측면을 직접 측정하는 지표를 핵심지표로, 구조 · 맥락을 대리 측정하는 지표를 보조지표로 분리하였다(표 3 참조). 표에는 기능별로 사용 빈도가 높은 대표 지표만을 제시하였다.

두 지표군의 구성은 기능군에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 조절서비스에 해당하는 기능들은 탄소 흡수 · 저장량, 대기오염물질 제거량, 우수유출 저감량, 토양 유실량과 같이 물리적 과정의 산출을 직접 계량하는 핵심지표를 갖추었고, 식생구조와 면적 · 유형 도메인의 지표는 이를 보완하는 보조지표에 머물렀다. 반면 식생구조 · 생태건전성, 회복력 · 지속가능성 · 다기능성, 생태계 비서비스 · 위해요소는 고유한 직접 측정 지표가 뚜렷하지 않아 수관피복률 · 경관형상지수 · NDVI 등 구조 · 맥락 지표에 상당 부분 의존하는 양상을 보였다. 이는 이들 기능이 서비스의 흐름이 아니라 생태계의 상태(condition) 또는 여러 기능을 가로지르는 평가축을 대상으로 삼기 때문으로, 캐스케이드상 '구조'와 '기능 · 서비스'의 경계에 위치함을 시사한다.

문화서비스의 속성이 강한 기능들은 문화 계열 세부 도메인을 핵심지표로, 접근성 · 도시화와 면적 · 유형을 공통 보조지표로 삼는 일관된 구조를 보였다. 다만 녹지공급 · 접근성 · 형평성은 녹지의 공급량과 이용자의 접근 가능성 및 그 분배 자체를 평가 대상으로 삼으므로, 접근성과 면적 지표를 예외적으로 핵심지표로 처리하였다. 이는 동일한 지표라도 어떤 기능을 평가하는 맥락에 놓이는가에 따라 캐스케이드상의 층위가 달라질 수 있음을 보여준다. 한편 표 3의 '*' 표시 지표는 해당 기능이 고정된 평가항목 없이 연구마다 상이한 항목으로 측정되어 이를 하나의 대표어로 통합한 것으로, 서비스를 직접 측정하되 단일한 조작적 정의를 갖지 않는다는 점에서 해석에 유의할 필요가 있다.

표 3. 기능별 동시출현 행렬 기반 핵심지표 및 보조지표

기능	핵심지표 측정도메인(지표명)	보조지표 측정도메인(지표명)	기능-지표 연결 수
탄소격리 · 기후변화완화	탄소(탄소격리 · 흡수량, 탄소저장량, 토양유기탄소, 산소생산량)	식생구조(생체량, 흉고직경, 수고, 수관피복률, NDVI 등)	150
대기정화	대기질(대기오염물질 제거량, 농도, 흡수량, 산소생산량)	식생구조(엽면적지수, 수관피복률, 녹지율), 면적 · 유형(녹지면적)	149
소음저감	소음(소음저감)*	경관구조(경관형상지수), 면적 · 유형(녹지면적, 녹지구조)	19
열섬완화 · 미기후조절	기후 · 열(냉각효과*, 지표면온도), 탄소(탄소격리 · 흡수량)	식생구조(수관피복률, 식생피복률), 면적 · 유형(녹지면적)	268
수문조절 · 홍수예방	수문(우수유출 저감량, 수자원 함양, 우수유출량)	면적 · 유형(녹지면적), 식생구조(식생피복률)	155
수질정화 · 수자원조절	수문(수자원 함양, 수질정화*), 토양(토양보전 · 침식), 대기질(대기오염물질 제거량)	면적 · 유형(녹지면적, 수체면적), 접근성 · 도시화(도시화 · 불투수면),	37
토양보전 · 침식조절	토양(토양화학성, 토양물리성), 탄소(토양유기탄소)	접근성 · 도시화(도시화 · 불투수면)	39
영양순환 · 생태순환	공급(식량생산), 생물다양성(종다양성지수), 토양(토양화학성)	경관구조(경관형상지수)	11
서식지제공 · 생물다양성	생물다양성(종다양성지수, 서식지 질 · 제공), 종합 · 위해(재해 · 위해 요소)	경관구조(경관형상지수), 면적 · 유형(녹지면적), 식생구조(식생피복률)	172
생태계 안정성 · 회복력	생물다양성(종다양성지수), 폐기물(폐기물처리)*, 토양(토양중금속)	면적 · 유형(녹지면적), 식생구조(수관피복률, 식생피복률)	69
식생구조 · 생태건전성	생물다양성(종다양성지수, 서식지 질 · 제공, 자생종 비율)	식생구조(수관피복률, 식생구조 · 층위, 흉고직경)	60
원료 · 목재 공급	공급(식량생산, 원료 · 목재 공급)*, 탄소(낙엽 · 고사목 탄소)	식생구조(생체량), 면적 · 유형(녹지유형, 녹지면적). 식생구조(식생피복률)	43
식량생산	공급(식량생산)*, 생물다양성(수분 · 종자분산), 토양(토양화학성)	면적 · 유형(녹지유형), 식생구조(생체량), 접근성 · 도시화(인구밀도)	29
수자원공급	공급(수자원공급, 식량생산)*, 토양(토양물리성)	-	4
휴양 · 여가	문화 · 휴양(휴양 · 여가*, 경관요소 · 시설), 문화 · 심미(심미 · 경관미)*	접근성 · 도시화(접근성), 면적 · 유형(녹지면적, 녹지구조, 녹지유형)	159
정신건강 · 치유 · 웰빙	문화 · 건강(정신건강 · 치유)*, 문화 · 휴양(휴양 · 여가), 문화 · 심미(심미 · 경관미)*	접근성 · 도시화(접근성), 기타 · 환경변수(건강 · 인구통계 변수)	127
녹지공급 · 접근성 · 형평성	접근성 · 도시화(접근성, 도로 · 교통밀도), 면적 · 유형(녹지면적)	경관구조(경관형상지수), 식생구조(NDVI, 식생피복률)	93
심미 · 경관 향유	문화 · 경관(경관요소 · 시설), 문화 · 심미(심미 · 경관미)*, 생물다양성(종다양성지수)	식생구조(식생피복률, 녹시율), 경관구조(경관형상지수)	82
영적 · 문화유산 · 장소성	문화 · 가치(영적 · 문화유산 가치)*, 문화 · 휴양(휴양 · 여가)*	면적 · 유형(녹지면적), 식생구조(NDVI), 기타 · 환경변수(기상 · 지형 환경변수)	51
교육 · 학습	문화 · 교육(교육 · 학습)*, 생물다양성(종다양성지수)	식생구조(수관피복률, 식생피복률), 접근성 · 도시화(접근성)	38
사회적 상호작용 · 결속	문화 · 사회(사회적 상호작용 · 결속)*, 문화 · 가치(영적 · 문화유산 가치)*	접근성 · 도시화(접근성), 면적 · 유형(녹지면적)	35
회복력 · 지속가능성 · 다기능성	대기질(대기오염물질 제거량), 문화 · 건강(정신건강 · 치유)*	경관구조(경관형상지수), 식생구조(NDVI)	49
경제적 가치 · 도시경제	종합 · 가치(경제적 가치)*, 기후 · 열(에너지 절감량), 공급(원료 · 목재 공급)	기타 · 환경변수(건강 · 인구통계 변수), 접근성 · 도시화(인구밀도)	35
생태계 비서비스 · 위해요소	대기질(대기오염물질 농도), 종합 · 위해(재해 · 위해 요소)*	접근성 · 도시화(도시화 · 불투수면), 기타 · 환경변수(에너지 · 자원 소비)	41

*고정된 평가 항목 없이 다양한 항목으로 측정되어 대표어로 통합한 지표
핵심지표: 기능의 서비스 · 과정을 직접 계량하는 지표; 보조지표: 핵심지표를 대리하는 구조 · 맥락 지표

3.2.2 위계적 군집분석과 배정 규칙을 통한 기능군 구성 및 통계적 안정성 검증

앞선 분석을 통해서 도시녹지를 평가하기 위한 각 기능은 서로 구별되는 지표 사용 양상을 보였으며, 이는 다수의 기능이 측정 차원에서 특정 지표군을 공유함을 의미한다. 이러한 기능들을 지표 사용 양상의 유사성에 근거해 상위 기능군으로 통합하기 위해 위계적 군집분석으로 24개 기능의 측정 양상에 대한 군집 구조를 확인하고, 연구 방법에서 제시한 배정 규칙을 적용하여 6개 기능군과 1개 메타축으로 최종 분류하였다. 여기서 군집분석은 기능군

의 골격을 제공하며, 각 기능의 최종 배정은 연구 방법에서 제시한 배정 규칙에 따라 확정하였다. 구체적으로 덴드로그램을 k = 7 수준에서 절단하면 7개 군집이 분리되나, 이 군집들이 최종 기능군·메타축과 일대일로 대응하지는 않는다. 지표 사용 양상이 수렴하는 여섯 계열은 최종 기능군 F1–F6의 골격을 이루는 반면, 고유 지표군 없이 여러 계열에 분산되는 회복력·지속가능성·다기능성, 경제적 가치·도시경제, 생태계 비서비스·위해요소는 하나의 군집으로 응집하지 않아 병렬적 기능군(F7)이 아니라 횡단·통합 평가축(M)으로 구분하였다. 이하의 덴드로그램(그림 4 참조)은 기능 간 거리가 가까울수록 낮은 값에서 서로 연결되며, 두 기능이 연결되는 가로축의 거리가 짧을수록 지표 사용 양상이 유사함을 의미한다.

덴드로그램에서 24개 기능은 각 기능의 지표 사용 양상의 유사도에 따라 위계적으로 병합되었다(그림 4 참조). 전체적으로 자원 공급 기능군(하단), 조절 계열 기능군(중하단), 생물·서식 및 인간 이용·문화 계열(중상단)이 상대적으로 높은 군집 간 거리에서 갈라지는 구조가 관찰되어, 도시녹지 기능이 측정 차원에서 물질 산출(공급)·환경 조절·생태 상태·인간 이용이라는 대분류로 위계화됨을 보여준다. 이때 각 기능에 배정된 6개 기능군과 1개 메타축(그림에서 개별 기능의 색으로 표시)은 덴드로그램의 단일 절단 수준과 완전히 일치하지 않았다. 수문·토양 조절(F3)·생물·서식·구조 지지(F4)·인간 이용·사회·문화(F6)의 핵심 묶음은 군집 구조에서도 가까운 거리에서 재현된 반면, 일부 기능은 배정된 기능군과 다른 묶음에 인접하였다. 대표적으로 대기·음환경 조절(F1)의 소음저감은 다른 F1 기능과 멀리 떨어진 상단의 혼합 군집에 연결되었고, 인간 이용·사회·문화(F6)의 심미·경관 향유와 교육·학습은 생물·서식(F4) 및 미기후·열(F2) 계열이 포함된 중간 수준의 묶음에 인접하였다. 또한 횡단·통합 평가축(M)의 세 기능은 독립적인 묶음을 형성하지 않고 각기 다른 계열에 분산되었다. 이러한 불일치의 양상과 각 기능의 배정 근거는 표 4에 정리하였으며, 아래에서 기능군별로 지표 공유 구조와 함께 구체적으로 확인된다.

F1(탄소격리·기후변화완화, 대기정화, 소음저감)은 대기 질과 음환경 등 비생물적 환경을 조절한다는 공통성을 지니지만, 세 기능의 측정 지표는 거의 겹치지 않았다. 탄소격리·기후변화완화는 탄소흡수량·탄소저장량·토양유기탄소 등 탄소 지표에, 대기정화는 대기오염물질 제거량·농도 등 대기질 지표에, 소음저감은 소음 지표에 각각 배타적으로 집중하였다. 그 결과 탄소격리·기후변화완화와 대기정화는 조절 계열 내에서 별도의 쌍으로 연결되었고, 소음저감은 이들과 멀리 떨어진 상단의 혼합 군집에 연결되었다. 즉 F1의 세 기능은 지표 사용 양상상 서로 근접하지 않았으며, 하나의 기능군으로 배정된 근거는 측정 유사성이 아니라 '비생물적 환경 조절'이라는 개념적 공통성에 있었다.

F2는 열섬완화·미기후조절이라는 단일 기능으로 구성되며, 본 문헌군에서 가장 많이 연구된 기능(n = 268)으로 나타났다. 이 기능은 냉각효과·지표면온도(LST) 등 열 관련 직접 지표를 중심으로 수관피복률·녹지면적 등 식생구조·규모 지표를 함께 사용하였다. 식생구조 지표를 공유하는 특성으로 인해 지표 사용 양상상으로는 생물·

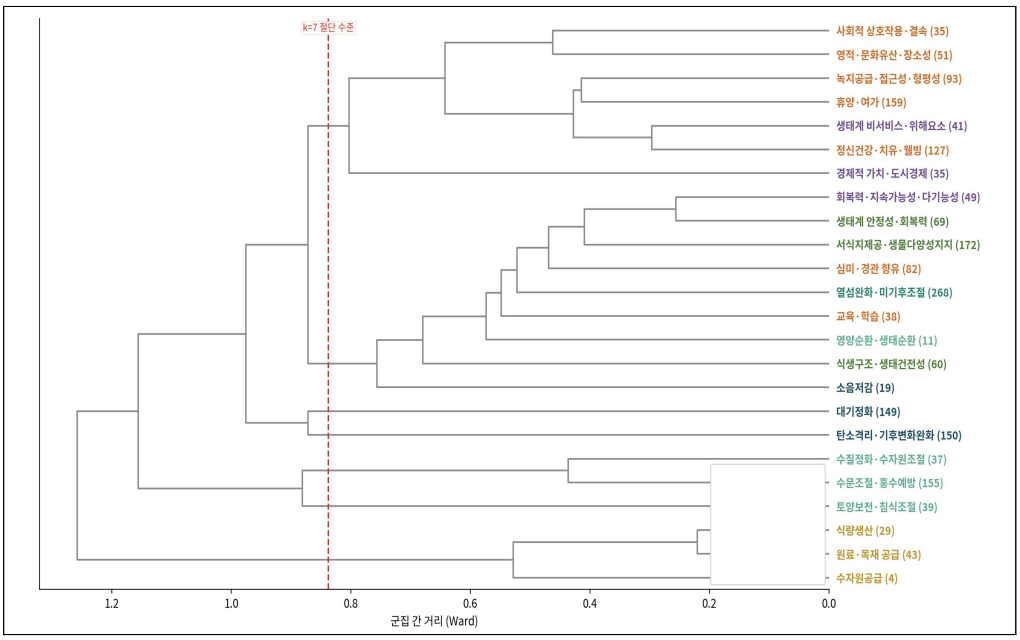


그림 4. Ward 연결법을 활용한 위계적 군집분석 덴드로그램

범례: F1 대기·음환경 조절 / F2 미기후·열 조절 / F3 수문·토양 조절 / F4 생물·서식·구조 지지 / F5 자원 공급 / F6 인간 이용·사회·문화 / M 횡단·통합 평가축

표 4. k = 7 단일 절단 결과와 최종 배정이 상이한 기능의 분류 근거

기능	k = 7 단일 절단 위치	최종 배정	적용 근거
탄소격리 · 기후변화완화	단독 군집	F1	탄소 · 대기 · 소음이 측정상 배타적이나 비생물적 환경 조절로 공통
대기정화	단독 군집	F1	
소음저감	다른 F1 기능과 동시군집 되지 않음	F1	
열섬완화 · 미기후조절	F4, F6과 근접하게 나타남	F2	수관피복률 등 식생구조 지표를 F4와 공유하여 측정상 근접하나, 냉각효과 · 지표면온도 등 직접 열 지표가 독자적인 측정 축을 이루므로 별도 기능군으로 유지
영양순환 · 생태순환	다른 F3 기능과 동시군집 되지 않음	F3	토양 · 수질 지표 공유로 개념적으로 F3에 귀속
교육 · 학습	F6에 해당하는 기능과는 거리가 있음	F6	종풍부도 등 생태 지표를 일부 공유하지만, 부트스트랩에서 F6과 안정적 동시군집
심미 · 경관 향유	F6에 해당하는 기능과는 거리가 있음	F6	식생피복률, 녹시율 등 일부 지표를 공유하지만, 부트스트랩에서 F6과 안정적 동시군집
회복력 · 지속가능성 · 다기능성	F2, F4 기능들과 결합	M	고유 지표군 부재, 여러 계열 종합과 같은 횡단적 양상
경제적 가치 · 도시경제	F6 기능들과 결합	M	이질적 화폐가치 지표
생태계 비서비스 · 위해요소	단독 군집	M	고유 지표군 부재, 대기오염 농도 · 도시화 · 불투수면 등 인간이용 · 환경 부하 지표

서식(F4) 및 다기능성 계열과 가까웠으며, 덴드로그램에서도 중간 수준의 거리에서 이들과 인접하게 연결되었다. 그럼에도 열 조절은 도시 폭염 · 열섬 대응이라는 독자적 기능 축으로서 별도 기능군으로 유지되었다.

F3(수문조절 · 홍수예방, 수질정화 · 수자원조절, 토양보전 · 침식조절, 영양순환 · 생태순환)은 하나의 조밀한 묶음으로 응집하기보다 두 개의 하위 짝을 중심으로 결합하였다. 하나는 수문조절 · 홍수예방과 수질정화 · 수자원조절로 이루어진 물 관련 짝으로, 우수유출 저감량 · 수자원 함양 · 수질정화 등 수문 지표를 공유하며 F3 내에서 가장 강하게 결합하였다. 다른 하나는 토양보전 · 침식조절과 영양순환 · 생태순환으로, 토양 화학성 · 물리성 지표를 공유하는 토양 관련 짝을 이루었으나 결합 강도는 물 관련 짝보다 약하였다. 특히 영양순환 · 생태순환은 토양 지표와 수질 지표를 함께 활용하여 두 짝을 잇는 성격을 지니면서도, 사용 빈도가 매우 낮아(n = 11) 어느 쪽과도 느슨하게 연결되었다. 그 결과 덴드로그램에서는 수문조절 · 수질정화 · 토양보전이 가까운 거리에서 하나의 묶음으로 연결된 반면 영양순환 · 생태순환은 중간 수준의 묶음으로 이탈하였으며, F3 전체는 물 관련 짝을 핵심으로 하고 토양 관련 기능이 느슨하게 결합한 중간 수준의 응집을 보였다.

F4(서식지제공 · 생물다양성지지, 생태계 안정성 · 회복력, 식생구조 · 생태건전성)의 세 기능은 생체량 · 식생지수(NDVI). 종다양성지수 · 서식지 질 · 식생피복률 등 생물다양성 관련 및 식생의 구조와 관련한 지표를 공통적으로 활용하였다. 측정 지표가 실질적으로 중첩됨에 따라 덴드로그램에서도 세 기능이 가까운 거리에서 묶여 하나의 군집을 형성하였다. F4는 개념적 유사성과 측정 유사성이 동시에 성립하여, 데이터 구조와 해석적 배정이 일치한 기능군이었다.

F5(원료 · 목재 공급, 식량생산, 수자원공급)의 세 기능은 도시녹지가 산출하는 물질적 재화(원료 · 목재 공급량, 식량생산량 등)를 직접 측정하는 공급 지표를 공유하였다. 특히 원료 · 목재 공급과 식량생산은 지표 사용 양상이 거의 동일하여 강하게 결합하였다. 덴드로그램에서 F5는 다른 기능군과 상대적으로 먼 거리에서 분리되어 독립적인 군집을 형성함으로써, 물질 산출이라는 기능적 성격이 여타 계열과 구분됨을 보였다. 다만 개별 기능의 문헌 수가 적어(수자원공급 n = 4) 표본 크기의 제약을 함께 고려할 필요가 있다.

F6은 휴양 · 여가, 정신건강 · 치유 · 웰빙, 녹지공급 · 접근성 · 형평성, 심미 · 경관 향유, 영적 · 문화유산 · 장소성, 교육 · 학습, 사회적 상호작용 · 결속의 일곱 기능으로 구성되어, 규모가 가장 큰 기능군으로 나타났다. 이 기능군은 접근성 · 1인당 녹지면적 · 녹지면적 등 이용 가능성 지표와 심미 · 경관미 · 휴양 · 여가 가치 등 문화 지표를 광범위하게 공유하면서 각각 고유한 문화적 기능으로 분화하였다. 휴양 · 여가, 정신건강 · 치유 · 웰빙, 녹지공급 · 접근성 · 형평성은 지표 사용 양상이 거의 동일하여 강하게 결합하였고, 영적 · 문화유산 · 장소성과 사회적 상호작용 · 결속 역시 사회 · 문화 지표를 매개로 밀접하게 연결되었다. 한편 심미 · 경관 향유와 교육 · 학습은 F6에 배정되었음에도 단일 덴드로그램에서는 생물 · 서식(F4) · 미기후(F2) 계열이 포함된 중간 수준의 묶음에 인접하였는데, 이는 두 기능이 식생피복률 · 녹시율(경관 향유) 또는 종풍부도(교육) 등 생태 · 구조 지표를 부분적으로 함께 활용한 데 따른 것이다. 다만 후술하는 부트스트랩 검증에서 두 기능은 F6의 다른 기능들과 안정적으로 동시군집되어, 단일 절단에서의 위치와 무관하게 이용 · 문화 축에 귀속되는 것으로 확인되었다.

M(회복력 · 지속가능성 · 다기능성, 경제적 가치 · 도시경제, 생태계 비서비스 · 위해요소)의 세 기능은 서로 공유하는 고유한 지표군을 갖지 않아 독립된 군집을 형성하지 않았다. 회복력 · 지속가능성 · 다기능성은 여러 생태계서

비스 범주를 종합하는 성격상 생물·서식(F4) 및 열 조절(F2) 계열과 지표 사용 양상을 공유하며 그쪽으로 결합하였고, 생태계 비서비스·위해요소는 대기오염물질 농도·도시화·불투수면 등 인간 이용·환경 부하와 관련된 지표를 인간 이용·문화(F6) 계열과 공유하며 그쪽으로 결합하였다. 반면 경제적 가치·도시경제는 화폐화된 가치·에너지 절감량 등 이질적 지표에 의존하여 어느 군집과도 약하게만 연결되며 사실상 고립되었다. 이처럼 M의 세 기능은 특정 기능이 아니라 여러 기능에 걸쳐 분산되는 횡단적 양상을 보였다. 이러한 성격 때문에 본 연구는 이 범주를 F1–F6과 병렬하는 일곱 번째 기능군(F7)으로 명명하지 않고, 횡단·통합 평가축을 뜻하는 M(meta)으로 구분하였다. F2–F6은 공유하는 지표 사용 양상 또는 기능별 직접 측정지표를 바탕으로 구분된 기능 차원이다. 반면 F1은 탄소격리·기후변화완화, 대기정화, 소음저감의 지표 사용 양상이 서로 분리되어 있고 군집 내 컨센서스도 낮게 나타났으나, 세 기능이 모두 비생물적 환경을 조절한다는 개념적 공통성에 근거하여 구성한 해석적 기능군이다. M에 속한 다기능성·경제적 가치·비서비스는 고유한 측정 지표군을 갖기보다 여러 기능에 걸쳐 분산되거나 이들을 종합·매개하는 상위·횡단적 평가 차원에 해당한다.

컨센서스 행렬(그림 5 참조) 분석 결과, 최종 기능군 F1–F6에 배정된 기능 쌍의 평균 동시군집 비율(군집 내 컨센서스 0.66)이 상이한 기능군 쌍의 평균(군집 간 컨센서스 0.20)보다 뚜렷하게 높았다. 반면 M의 세 기능은 서로

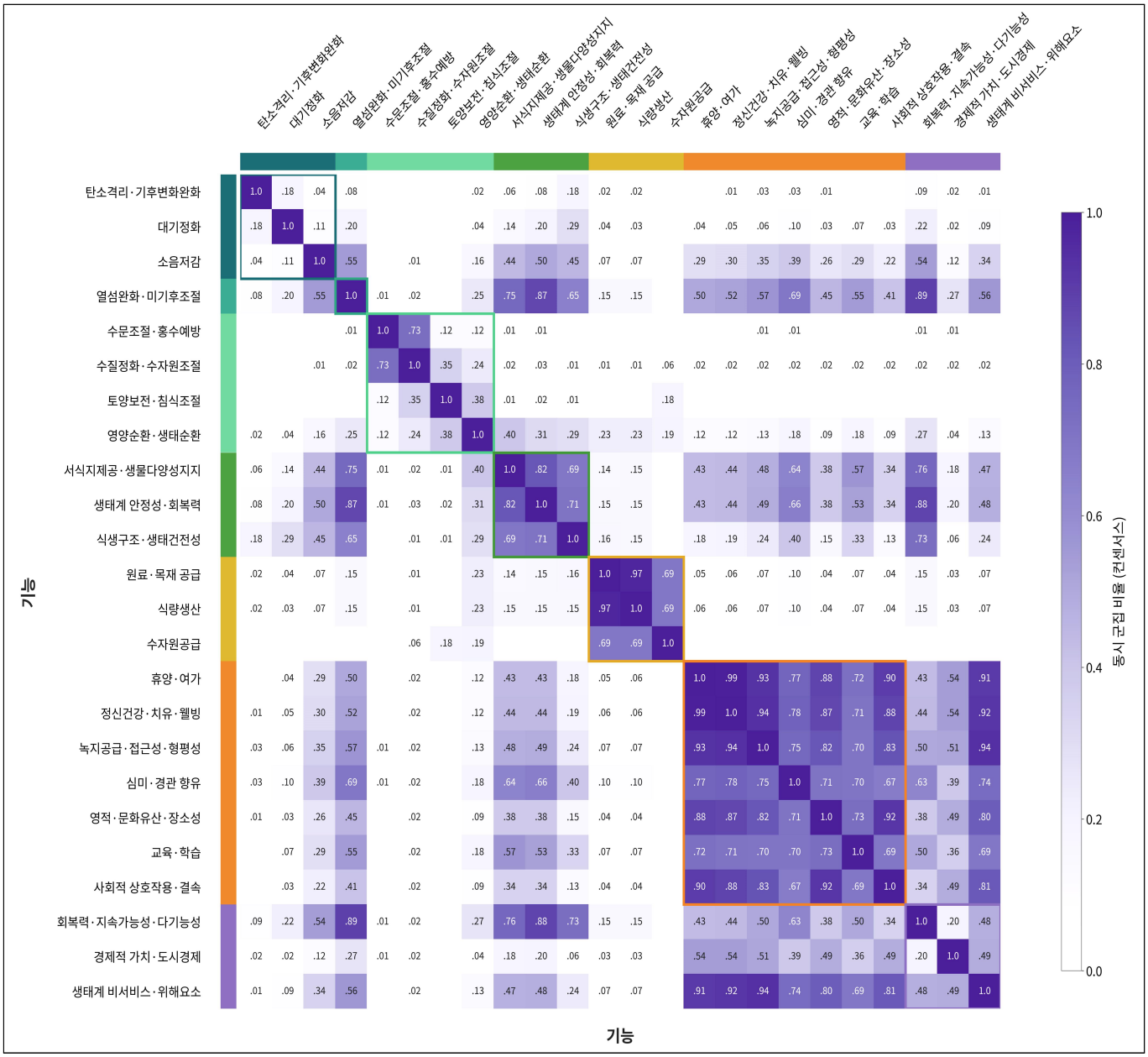


그림 5. 부트스트랩을 활용한 기능군 군집분석 안정성 검증(컨센서스 행렬)

간 평균 동시군집 비율이 0.39에 그쳐 독립 군집으로서의 응집을 이루지 않았으며, 이는 M을 최종 기능군이 아니라 횡단·통합 평가축으로 규정한 근거와 정합적이다. 이에 M의 세 기능은 군집 내 컨센서스 산정에서 제외하고 그 내부 응집도를 별도로 보고하였다. 기능군별로는 F6(0.80)·F5(0.78)·F4(0.74)가 견고한 경험적 군집을, F3(0.35)가 중간 수준의 응집을 보였으며, F1(0.11)은 탄소·대기·소음이 서로 독립적으로 나타나 군집 내 컨센서스가 가장 낮았다. 앞서 견고한 경험적 군집으로 나타난 기능군 중 F4·F6은 Hellinger 변환을 적용한 민감도 분석에서도 군집 구조가 유지되어(부록 1 참조), 이들이 특정 거리 정의에 의존하지 않음을 뒷받침한다. 반면 F5는 컨센서스상 응집은 높았으나 거리 변환에는 민감하였는데, 이는 수자원공급(n = 4)의 표본 제약에 기인한다(부록 1 참조).

생물·서식·구조 지지(F4)와 인간 이용·사회·문화(F6)는 군집 내 동시군집 비율이 매우 높아 견고한 경험적 군집으로 나타났다. 특히 F6에서는 휴양·여가–정신건강·치유·웰빙이 거의 항상 같은 군집으로 묶였고(약 0.99), 녹지공급·접근성·형평성 또한 이 두 기능과 높은 비율로 결합하였다. F4에서도 서식지제공·생물다양성지지와 생태계 안정성·회복력이 높은 비율(약 0.82)로 동시군집되었으며, 앞서 단일 덴드로그램에서 위치가 어긋났던 심미·경관 향유와 교육·학습도 F6 내 기능들과 안정적으로 결합하였다. 반면 수문·토양 조절(F3)은 수문조절–수질정화의 물 관련 짝(약 0.73)과 토양보전–영양순환의 토양 관련 짝을 중심으로 한 중간 수준의 응집을 보였고, 대기·음환경 조절(F1)은 탄소·대기·소음이 서로 독립적으로 나타나 군집 내 컨센서스가 매우 낮았다.

횡단·통합 평가축(M)은 독립 군집을 형성하지 않았다. 회복력·지속가능성·다기능성은 생물·서식(F4) 및 열 조절 계열과 높은 비율로 묶이고, 생태계 비서비스·위해요소는 인간 이용·문화(F6)와 강하게 결합한 반면, 경제적 가치·도시경제는 어느 군집과도 약하게만(약 0.16–0.23) 연결되었다. 종합하면 F4와 F6은 측정 지표 사용 양상과 부트스트랩 동시군집 비율이 함께 높은 경험적 군집으로 나타났다. F3은 중간 수준의 응집을 보였고, F5는 높은 동시군집 비율을 보였으나 거리 정의 변경에 일부 민감하였다. F2는 단일 기능으로 구성되어 군집 내 평균을 산정하지 않았다. 반면 F1은 통계적으로 응집된 군집이라기보다 비생물적 환경 조절이라는 개념적 공통성에 근거한 해석적 기능군이며, M은 독립 군집이 아닌 횡단·통합 평가축이다.

3.2.3 기존 생태계서비스 분류체계와의 정합성 평가 분석

24개 기능을 CICES v5.2에 사후 대응한 결과는 그림 6과 같다. 연결 빈도 기준으로 전체 1,915건 중 1,000건(52.2%)이 조절·유지, 457건(23.9%)이 문화, 76건(4.0%)이 공급 클래스에 대응하여 대응 연결의 합은 1,533건

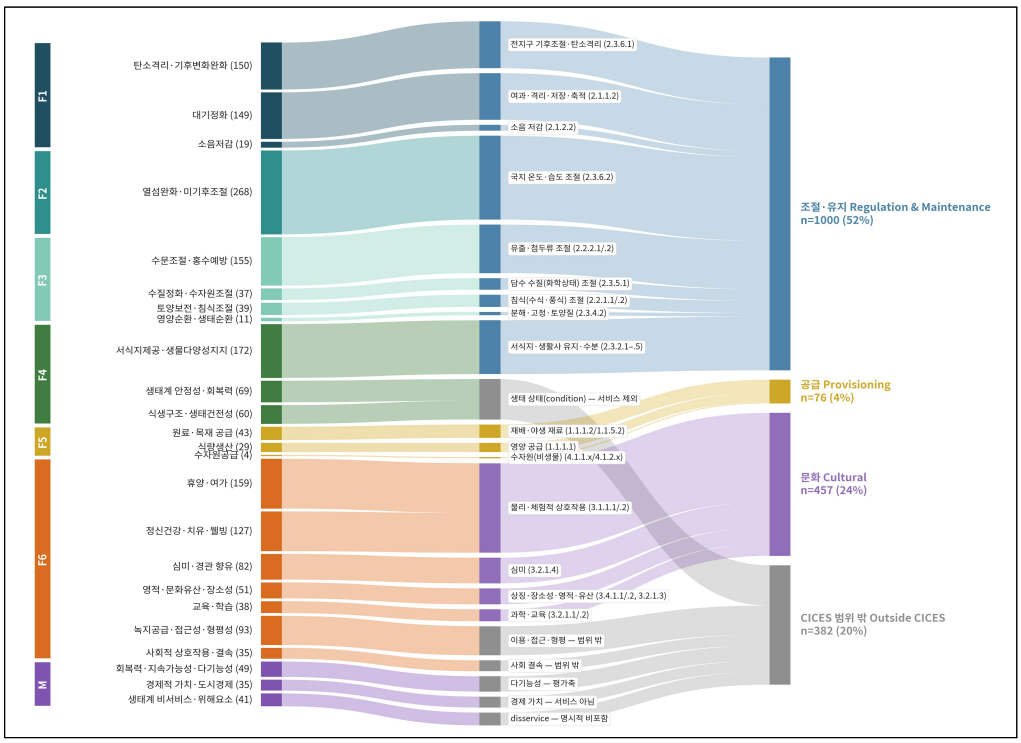


그림 6. CICES 분류체계와의 대응 관계

범례: F1 대기·음환경 조절 / F2 미기후·열 조절 / F3 수문·토양 조절 / F4 생물·서식·구조 지지 / F5 자원 공급 / F6 인간 이용·사회·문화 / M 횡단·통합 평가축

(80.1%)이었으며, 382건(19.9%)은 CICES의 최종 생태계서비스 분류 범위 밖에 해당하였다. 즉, 도시녹지 평가 문헌에서 사용된 기능-지표 연결의 약 5분의 1은 CICES의 최종 생태계서비스 중심 분류 범위에 포함되지 않았다. 기능 개수를 기준으로 하면 24개 중 17개(70.8%)가 CICES 클래스에 대응하고 7개가 범위 밖으로 대응되는 양상을 보였다.

조절·유지에 대응한 9개 기능은 각각 서로 다른 9개 클래스와 1:1로 짝을 이루었다. 열섬완화·미기후조절은 국지 온도·습도 조절(2.3.6.2)에, 탄소격리·기후변화완화는 전지구 기후조절(2.3.6.1)에, 대기정화는 여과·격리·저장(2.1.1.2)에, 소음저감은 소음 저감(2.1.2.2)에 대응하며, 수문조절·홍수예방은 유출·첨두류 조절(2.2.2.1/.2), 토양보전·침식조절은 침식 조절(2.2.1.1/.2), 수질정화·수자원조절은 담수 수질 조절(2.3.5.1), 영양순환·생태순환은 분해·고정과 토양질(2.3.4.2), 서식지제공·생물다양성지지는 서식지·생활사 유지(2.3.2.1-.5)에 각각 대응하였다. 문화에서는 심미·경관 향유가 심미(3.2.1.4)에, 교육·학습이 과학·교육(3.2.1.1/.2)에 대응하였고, 공급에서는 원료·목재 공급이 재배·야생 재료(1.1.1.2/1.1.5.2), 식량생산이 영양 공급(1.1.1.1), 수자원공급이 비생물 수자원(4.1.1.x/4.1.2.x)에 대응하였다.

다만 이러한 대응이 두 체계의 구조가 동일함을 뜻하지는 않으며, 그림 6의 대응 흐름에서는 네 가지 구조적 차이가 함께 드러난다. 첫째, 본 체계의 하나의 기능군이 CICES의 여러 상위 범주로 갈라져 흘러간다. F1(대기·음환경 조절)의 세 기능은 division 2.1(투입물의 변환)과 2.3(물리·화학적·생물학적 조건 유지)으로 나뉘고, F3(수문·토양 조절)의 네 기능은 division 2.2(기저 흐름·극한사상 조절)와 2.3으로 나뉜다. 문화 계열에서도 영적·문화유산·장소성은 상징·장소성(3.4.1.1)과 영적 의미(3.4.1.2)뿐 아니라 문화·유산(3.2.1.3)에 걸쳐 대응한다. 다만 이들이 본 체계에서 하나로 묶이는 근거는 기능군마다 다르다. F3와 영적·문화유산·장소성은 각각 수문·토양 지표와 상징·장소성이라는 측정 매질을 실제로 공유하여 묶인 반면, F1은 세 기능의 측정 지표가 서로 겹치지 않음에도 비생물적 환경 조절이라는 개념적 공통성에 근거해 묶인 사례이다. 어느 경우든 CICES가 전제하는 상위 범주의 개념적 근접성과는 다른 원리로 결속된다는 점은 공통된다. 둘째, 그림 6의 흐름 폭에서 확인되듯 동일한 대상이 두 체계에서 갖는 위계상 비중이 상이하다. 열섬완화·미기후조절은 CICES에서 세부 클래스 하나(2.3.6.2)에 지나지 않으나, 본 체계에서는 가장 굵은 단일 흐름을 이루는 최대 기능이자 독립 기능군을 형성한다. 셋째, 반대로 CICES가 재배/야생과 영양/재료로 세분해 둔 공급 서비스는 도시녹지 문헌에서 가장 가는 흐름에 그쳐, 세분된 클래스 수에 견주어 실제 측정 비중이 현저히 작았다. 넷째, 측정 양상만으로는 갈라지지 않는 지점도 확인된다. 휴양·여가와 정신건강·치유·웰빙은 CICES에서 동일 클래스(3.1.1)로 수렴하여 그림 6에서도 문화 흐름의 대부분을 함께 형성하지만, 본 체계에서는 별개 기능으로 유지된다. 두 기능은 접근성·이용 관련 지표를 광범위하게 공유하여 F6 내에서 가장 유사한 짝을 이루며, 이들을 실질적으로 가르는 것은 각각의 문화 계열 세부 지표의 상대적 집중도에 국한된다. 즉 이 분리는 측정 양상의 차이라기보다 문헌이 두 기능을 서로 다른 평가 대상으로 라벨링해 온 관행에 기대고 있어, 본 체계의 기능 구분이 측정 근거와 문헌 관행 사이에서 결정되는 연성 분류임을 보여준다.

범위 밖 382건은 그 성격에 따라 네 개의 축으로 나뉜다. 첫째, 생태적 상태 축은 129건(6.7%)으로 생태계 안정성·회복력(69)과 식생구조·생태건전성(60)이 해당한다. CICES는 생태계의 상태를 서비스가 성립하기 위한 선행 조건으로 보아 계정에서 제외하나, 도시녹지 문헌은 이를 평가의 대상 자체로 다루어 왔다. 둘째, 이용·접근·형평 축은 93건(4.9%)으로 녹지공급·접근성·형평성 한 기능이며, 범위 밖 단일 기능 중 가장 큰 비중이다. 셋째, 사회적 관계 축은 35건(1.8%)으로 사회적 상호작용·결속이다. 둘째와 셋째 축은 이용자가 녹지에 도달하고 그 안에서 관계를 맺는 조건을 측정 대상으로 삼아, 생태계의 산출이 아니라는 점에서 함께 범위 밖에 놓인다. 넷째, 가치·평가축·비서비스 축은 125건(6.5%)으로, 서로 다른 네 가지 이유로 서비스에 계상되지 않는 기능이 묶인다. 회복력·지속가능성·다기능성(49)은 개별 서비스가 아니라 여러 서비스의 중첩 정도를 기술하는 평가축이고, 생태계 비서비스·위해요소(41)는 편익이 아닌 부(-)의 효과이며, 경제적 가치·도시경제(35)는 캐스케이드상 서비스보다 하류에 위치하는 가치 단계에 해당한다.

이 382건이 어느 기능군에서 발생하는지를 보면, 범위 밖 연결은 특정 지점에 집중되어 있다. F1·F2·F3은 전량이 조절·유지에, F5는 전량이 공급에, M은 전량이 범위 밖에 대응하여 CICES Section과 단일 대응 관계를 이루었다. 반면 F4와 F6은 두 갈래로 분할되었다. F4(총 301건)는 서식지제공·생물다양성지지(172)가 조절·유지에 대응하고 나머지 129건이 앞의 생태적 상태 축을 이루었으며, F6(총 585건)은 457건이 문화에 대응하고 나머지 128건이 이용·접근·형평(93)과 사회적 관계(35) 축을 이루었다. 따라서 범위 밖 382건은 F4에서 129건, F6에서 128건, M에서 125건이 발생하며, 앞의 두 기능군이 차지하는 몫은 257건으로 전체 범위 밖 연결의 67.3%에 이른다.

이 분포에서 정보가 되는 것은 M이 아니라 F4·F6이다. M은 애초에 서비스가 아닌 차원을 묶어 둔 범주이므로 전량이 범위 밖에 놓이는 것은 정의상 예견된 결과인 반면, F4와 F6은 CICES 클래스에 대응하는 기능과 대응하지 않는 기능이 하나의 기능군 안에 공존한다. 즉 도시녹지 평가 문헌은 서식지 제공이라는 서비스를 측정하면서

그것을 지탱하는 생태적 상태를 같은 지표군으로 함께 측정해 왔고, 휴양·심미라는 문화서비스를 측정하면서 그 서비스에 도달할 수 있는 이용 조건과 그 분배를 같은 지표군으로 함께 측정해 왔다. 두 체계의 불일치가 생태계의 상태를 다루는 축(F4)과 인간의 이용·배분을 다루는 축(F6)에 집중된다는 것은 이러한 의미이다.

요컨대 도시녹지 평가 문헌은 서비스의 산출만이 아니라, 그 산출을 지탱하는 생태적 상태와 이용자가 서비스에 도달하기 위한 조건까지를 하나의 평가 대상으로 함께 다루어 왔다. 자연 생태계를 전제로 설계된 분류 틀이 접근성·형평성·사회적 상호작용 등 도시 특유의 차원을 포괄하지 못한다는 지적은 이론적으로 반복 제기되어 왔으나(Gómez-Baggethun and Barton, 2013; Wolch et al., 2014), 본 결과는 그 지적이 실제 측정 관행에서 어느 정도 규모로(382건, 19.9%) 어느 축에서(F4·F6에 257건, 67.3%) 실행되어 왔는지를 문헌 근거에 기반해 특정한다는 점에서 구별된다.

3.2.4 각 기능별 평가 지표 가중치 산정

앞서 구분한 핵심지표와 보조지표를 대상으로 기능별 평가지표의 가중치를 산정하였다(그림 7 참조). 가중치는 문헌에서 실제 관측된 기능-지표 사용 빈도에 기반하며, 정보검색 분야의 TF-IDF를 차용하여 기능 내 지표 사용 비율(TF)과 지표의 고유성(IDF)의 곱으로 정의하였다. IDF는 해당 지표가 사용된 기능의 수가 많을수록 작아지므로, 녹지면적·접근성·NDVI와 같이 다수 기능에 두루 차용되는 범용 지표의 가중을 약화시켜 기능 간 변별력을 유지하는 역할을 한다. 산정된 가중치는 해당 기능에서 관측된 전체 지표를 대상으로 합이 1이 되도록 정규화하였으며, 핵심·보조의 구분은 지표 앞의 기호(●/○)로만 표기하고 가중치 자체에는 개입하지 않았다. 이는 계층 구분이 관측된 사용 근거를 사후에 덮어쓰지 않도록 하여, 실제 문헌에서 어떤 층위의 지표가 각 기능을 측정해 왔는지를 그대로 드러내기 위함이다.

기능별로 제시하는 지표의 수(k)는 사전에 고정하지 않고 자료로부터 결정하였다. 구체적으로 정규화 가중치 w_i가 균등 기대 비중 $1/n_i$(n_i는 해당 기능에서 관측된 지표의 총수)를 초과하는 지표를 채택하였다. 모든 지표가 균등하게 사용되었을 경우의 기대치를 기준선으로 삼는 방식으로, 요인분석의 평균 고유값 기준과 동일한 논리이다. 다만 현장 적용의 간편성과 최소한의 다중 측정을 함께 고려하여 k의 범위를 3-7개로 제한하였고, 가중치가 동일한 경우 사용 빈도가 높은 지표를 우선하였다. 그 결과 k는 3개(7개 기능)에서 7개(6개 기능)에 걸쳐 분포하였으며 평균 5.0개, 중앙값 5개로 나타나, 절단 기준을 자료에 맡기더라도 기능당 약 5개 수준의 간소한 지표 세트가 도출됨을 확인하였다.

각 기능에는 채택된 k개 지표의 가중치 합을 '누적'으로 병기하였다. 누적은 해당 기능의 TF-IDF 총량 중 제시된 지표가 차지하는 몫을 뜻하며, 정의상 '기타' 항목과 합이 1이 된다. 다만 IDF가 반영된 값이므로 해당 지표를 사용한 문헌의 비율이 아니라 고유성으로 가중된 사용 근거의 비율로 해석해야 한다. 미채택 지표는 제외하지 않고 '기타(n개)'로 합산 표시하여 절단에 따른 정보 손실이 발생하지 않도록 하였다. 누적은 수자원공급 1.00, 수문조절·홍수예방 0.83, 토양보전·침식조절 0.81에서 높게 나타난 반면, 회복력·지속가능성·다기능성 0.45, 생태계 안정성·회복력 0.55, 서식지제공·생물다양성지지 0.62에서 낮아, 기능에 따라 측정 근거의 집중도가 상당히 다름을 보여준다.

산정 결과, 가중치의 분포 양상은 기능에 따라 상이하게 나타났다. 소음저감(소음저감 0.67), 수자원공급(수자원공급 0.60), 교육·학습(교육·학습 0.56), 경제적 가치·도시경제(경제적 가치 0.55), 사회적 상호작용·결속(사회적 상호작용·결속 0.52), 영적·문화유산·장소성(영적·문화유산 가치 0.48), 휴양·여가(휴양·여가 0.43) 등은 단일 핵심지표에 가중이 집중되었는데, 이는 해당 기능이 기능 대표어와 지표 대표어가 사실상 일치하는 소수의 지표에 의존하여 측정되어 왔음을 반영한다. 반면 수문조절·홍수예방(우수유출 저감량 0.29, 우수유출량 0.21, 수자원 함양·조절 0.19), 토양보전·침식조절(토양보전·침식조절 0.32, 토양 화학성 0.22, 토양 물리성 0.15), 영양순환·생태순환(식량생산 0.21, 토양 화학성 0.21) 등은 복수의 핵심지표에 가중이 분산되어, 하나의 기능이 여러 직접 지표의 조합으로 평가되고 있음을 보여준다. 특히 회복력·지속가능성·다기능성은 최상위 지표의 가중치가 0.09에 그치고 누적도 0.45에 머물러, 고유한 측정 체계를 갖추기보다 여러 기능의 지표를 폭넓게 차용하는 횡단적 평가축의 성격을 드러냈다.

한편 24개 기능 중 21개에서 최상위 가중치를 핵심지표가 차지하여, 서비스를 직접 측정하는 지표가 기능의 수준을 대표한다는 3.2.1의 논의가 관측 자료에서도 대체로 지지되었다. 다만 식생구조·생태건전성(흉고직경 0.20), 생태계 비서비스·위해요소(에너지·자원 소비 0.24), 회복력·지속가능성·다기능성(NDVI 0.09)의 3개 기능에서는 보조지표가 최상위에 위치하였다. 이는 해당 기능들이 서비스의 발현 자체를 측정하는 지표를 아직 확보하지 못한 채 구조·맥락 변수의 대리 측정에 의존하고 있음을 시사하며, 향후 직접 측정지표의 개발이 우선적으로 요구되는 영역으로 해석할 수 있다.

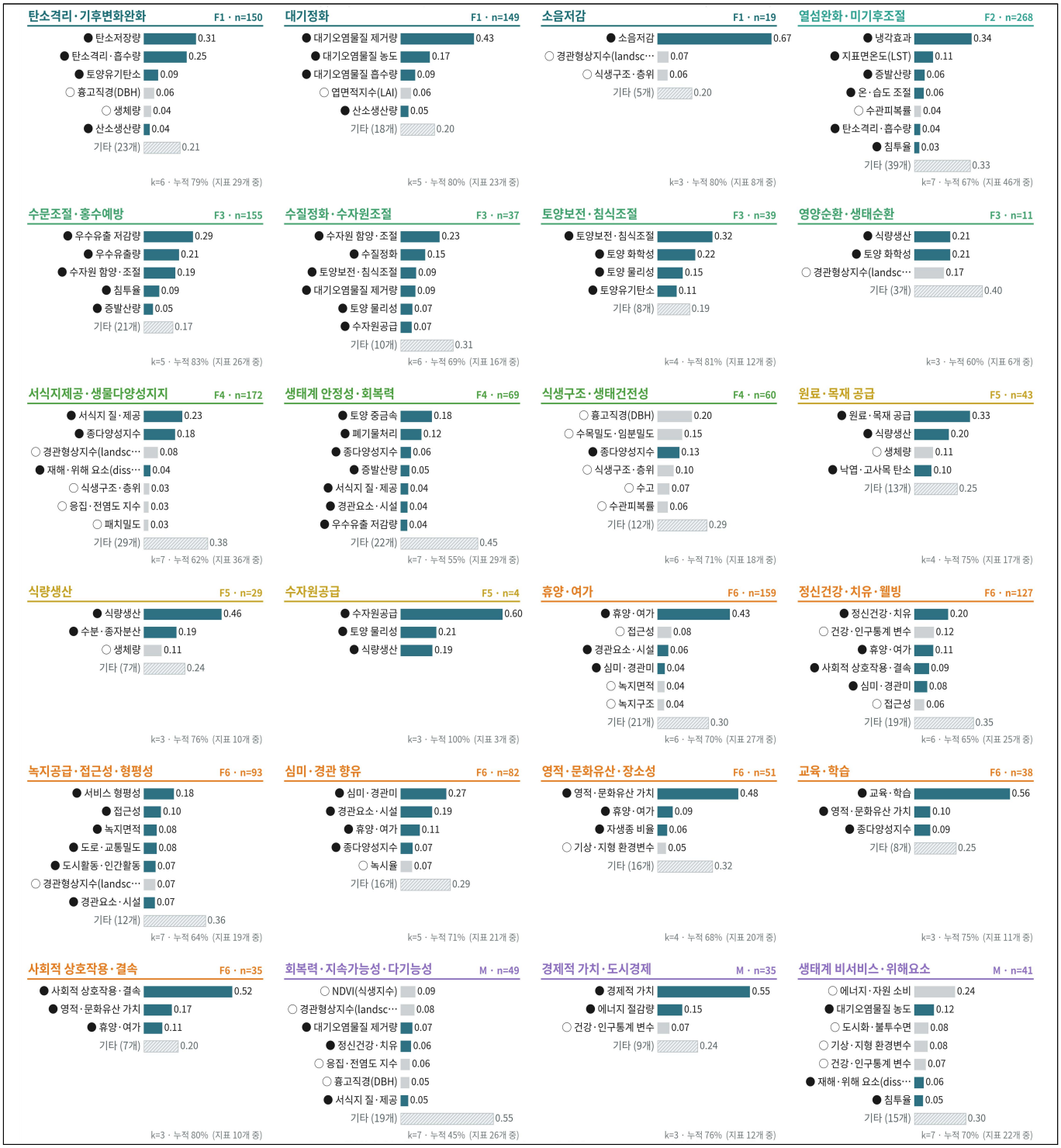


그림 7. TF-IDF를 활용한 각 기능별 지표 가중치
범례: 핵심(직접측정)지표 보조(구조·맥락)지표 기타(미표시 지표 합)

4. 결론

4.1 연구 결론

본 연구는 도시녹지를 기능 단위로 분류하기 위한 토대로서, 기존 연구가 도시녹지의 기능을 실제로 어떤 지표로 측정해 왔는지를 체계적 문헌 고찰을 통해 귀납적으로 통합하고자 하였다. PRISMA 2020 절차에 따라 선정한

247편에서 기능-지표 연결 1,915건을 추출·표준화하여 기능 대표어 24개와 지표 측정도메인 23종을 도출하고, 이를 동시출현 행렬로 집계한 뒤 군집구조 탐색과 안정성 점검, 기존 분류체계 대응, 지표 가중치 산정의 순으로 분석한 결과는 다음과 같이 요약된다.

첫째, 도시녹지의 기능은 개념적으로 어떻게 정의되는가보다 실제로 어떤 지표로 측정되어 왔는가에 따라 더 분명하게 구별되었다. 각 기능은 서로 뚜렷이 다른 고유한 지표 사용 양상을 보였으며, 한 기능이 소수의 지표에 얼마나 집중되어 측정되는지는 기능마다 크게 달랐다. 어떤 기능은 자신을 직접 계량하는 한두 개의 지표에 측정이 강하게 몰려 있었던 반면(예: 탄소격리·기후변화완화, 토양보전·침식조절), 어떤 기능은 접근성·면적처럼 여러 기능이 함께 쓰는 지표에 의존하여 측정이 넓게 분산되어 있었다(예: 정신건강·치유·웰빙). 이러한 차이는 조절기능이 확립된 생물리적 지표로, 문화 기능이 사회·공간적 대리 지표로 측정되어 왔다는 기존 관찰과도 일치하며(Feld et al., 2009; Layke, 2009), 캐스케이드 모델이 요구하는 '측정 대상이 구조인가 기능·서비스인가'의 구분이 도시녹지 평가 관행에서 실제로 어떻게 작동해 왔는지를 지표 수준에서 보여준다.

둘째, 위계적 군집분석으로 확인한 지표 사용 양상의 군집 구조와 배정 규칙을 종합하여, 24개 기능을 6개의 최종 기능군(F1-F6)과 1개의 횡단·통합 평가축(M)으로 분류하였다. 247편을 1,000회 복원추출한 부트스트랩 컨센서스 분석 결과, F4와 F6은 군집 내 동시군집 비율이 높은 견고한 경험적 군집으로 나타났다. 반면 F1은 개별 기능 간 지표 사용 양상이 분리되어 있어 비생물적 환경 조절이라는 개념적 공통성에 근거하여 구성되었으며, M 역시 고유한 지표군을 형성하기보다 여러 기능을 종합·매개하는 횡단적 평가 차원으로 나타났다. F2는 F4와 식생구조 지표를 일부 공유하였으나, 냉각효과와 지표면온도 등 직접 열 지표 및 평가 대상의 독자성에 따라 별도 기능군으로 유지하였다. 따라서 본 체계는 단일 덴드로그램의 절단 결과만으로 확정된 군집이 아니라, 지표 사용 양상, 부트스트랩 컨센서스, 기능의 직접 측정 대상 및 개념적 범위를 종합하여 구성한 기능 분류이다. 이는 도시녹지 기능 간 관계가 기능의 산출 국면뿐 아니라, 문헌에서 기능을 어떤 지표로 조작화하는가의 측정 국면에서도 중첩되고 분화됨을 보여준다.

셋째, 귀납적으로 도출한 체계를 CICES v5.2에 사후 대응한 결과, 연결의 약 80%가 조절·유지·문화·공급 클래스에 대응하였고, 나머지 약 20%의 연결은 CICES의 서비스 범주에 포함되지 않는 항목과 관련되었다. 이 두 결과는 서로 다른 의미를 갖는다. 높은 대응 비율은 문헌에서 관측된 기능-지표 사용 양상을 바탕으로 도출한 본 체계가 CICES 분류체계와 상당 부분 대응함을 보여준다. 반면 범위 밖 연결은 기존 분류체계의 누락이라기보다, 문헌에서 실제로 측정된 항목과 CICES의 최종 생태계서비스 중심 분류 범위 사이에 존재하는 차이를 나타낸다. 요컨대 두 체계는 우열의 관계가 아니라 목적이 다른 보완적 체계이다. CICES가 최종 생태계서비스를 분류하기 위한 체계라면, 본 체계는 도시녹지의 기능을 어떠한 지표로 평가해 왔는지를 파악하기 위한 평가체계이다. 범위 밖 연결은 무작위로 흩어지지 않고 생태적 상태, 이용·접근·형평, 사회적 관계, 가치·비서비스의 네 축으로 나뉘었으며, 그 대부분이 생태계의 상태를 다루는 F4와 인간의 이용·배분을 다루는 F6의 분할에서 발생하였다. 아울러 두 체계 사이에서는 네 가지 구조적 차이가 관측되었다. ① 기능군 분산: 본 체계의 하나의 기능군이 CICES의 여러 상위 범주로 갈라진다. F1(대기·음환경 조절)은 division 2.1과 2.3으로, F3(수문·토양 조절)은 division 2.2와 2.3으로 나뉘는데, 이들이 하나로 묶이는 근거는 CICES 상위 범주의 개념적 근접성이 아니라 측정 지표의 매질 공유(F3) 또는 조절 대상의 개념적 공통성(F1)에 있다. ② 위계 승격: 열섬완화·미기후조절은 CICES에서 세부 클래스 하나에 불과하지만 본 체계에서는 최대 단일 기능이자 별도의 단일 기능군을 이루어, 도시 맥락의 정책적 비중이 자연 생태계를 전제한 분류의 위계에 반영되어 있지 않음을 보여준다. ③ 위계 축소: CICES가 재배/야생 × 영양/재료로 세분해 둔 공급 서비스는 도시녹지 문헌에서 4.0%에 그쳐, 도시녹지가 생산 기반이 아니라 조절·이용 기반 공간으로 연구되어 왔음을 시사한다. ④ 분화: 휴양·여가와 정신건강·치유·웰빙은 CICES의 동일 클래스에 대응하면서도 본 체계에서는 별개 기능으로 유지되어, 개념은 하나여도 측정은 둘로 갈라지는 국면을 보여준다. 이 네 차이는 도시 특유의 이용적·사회적 차원이 CICES의 최종 생태계서비스 분류 범위에 포함되지 않는 지점과 그 집중 정도를 드러낸다.

넷째, 이상의 기능-지표 체계를 실제 평가에 적용할 수 있도록 TF-IDF 원리를 차용하여 지표별 가중치를 산정하였다. 기능에 따라 핵심지표만으로 측정이 완결되는 경우와 핵심지표에 보조지표가 함께 동원되는 경우가 갈렸는데, 이 차이는 그 기능을 직접 관측할 수 있는 지표가 존재하는가의 여부에서 비롯된다. 물리적 과정의 산출을 직접 계량할 수 있는 기능은 그 산출값이 곧 핵심지표가 되어 소수의 직접 지표만으로 측정이 성립한 반면, 서비스의 흐름을 직접 계량하기 어렵거나 여러 기능을 가로지르는 대상을 다루는 기능은 이를 대리하는 구조·맥락 지표를 보조적으로 끌어와야 측정이 가능하였다. 한편, 본 체계의 지표는 특정 데이터의 유형·형태로 확정하지 않고 측정 도메인 수준에서 제시하였는데, 이는 동일 기능이라도 연구마다 활용하는 자료의 종류와 형태가 상이하여 하나의

데이터로 한정하기 어렵기 때문이며, 자료 가용성이 다른 여러 현장에서 각자의 조건에 맞는 데이터를 해당 지표로 조작화할 수 있도록 유연성을 확보하기 위한 것이다.

4.2 연구 의의

첫째, 도시녹지 기능 분류의 조직 원리를 개념에서 지표로 전환하였다는 점이다. 기존의 도시녹지 기능 평가 연구는 MEA · TEEB · CICES 등 사전에 규정된 분류 틀에서 출발하여 하위 지표를 배치하는 연역적 방식을 취해 왔으며(김은영 등, 2017), 그 결과 기능의 범주 구성은 분류 틀의 설계 원칙에 의해 사전 결정되었다. 본 연구는 반대로 문헌이 '무엇을 기능으로 라벨링하고 이를 무엇으로 측정해 왔는가'를 추출 규칙으로 삼아 기능을 귀납적으로 확정함으로써, 어떤 분류체계의 범주 구성과도 독립적인 문헌 기반 기능-지표 체계를 도출하였다. 이는 기능 개념을 새로 제안하는 작업이 아니라, 이미 축적된 평가 관행을 사후적으로 관측 가능하게 만드는 작업이며, 분류 틀의 전제가 자료에 각인되는 순환을 차단하였다는 점에서 방법론적으로 구별된다.

둘째, 생태계서비스 번들 분석의 축을 전환하여 새로운 분석 틀로 활용하였다는 점이다. 다수의 생태계서비스가 함께 나타나는 연관 구조를 동시출현으로 정량화하는 접근은 '서비스 간' 축에서 정립되어 왔으나(Raudsepp-Hearne et al., 2010; Mouchet et al., 2014), 본 연구는 이 원리를 '기능-지표' 축으로 전환하였다. 이를 통해 각 기능이 개념 정의가 아니라 실제 무엇으로 측정되는가를 드러내고, 기능 간 유사성을 측정 지표의 사용 양상의 거리로 조작화하여 군집 구조를 도출하고 배정 규칙과 통계적 안정성 검증을 수행할 수 있었다. 기능 분류에 대한 논의를 규범적 합의의 문제에서 관측 가능한 자료의 문제로 이동시킨 것은 후속 연구가 재현 · 확장할 수 있는 방법론적 토대가 된다.

셋째, 그간 이론적 주장에 머물렀던 지적들에 경험적 근거를 부여하였다는 점이다. 자연 생태계를 전제한 분류 틀의 한계, 생태계 상태를 독립 축으로 다루자는 논의(Maes et al., 2016; Czúcz et al., 2021), 위해요소를 평가에 포함하자는 제안(Lyytimäki and Sipilä, 2009; Von Döhren and Haase, 2015; Shackleton et al., 2016)은 오랫동안 축적되어 왔으나, 실제 관행에서 어느 정도 실행되어 왔는지는 실증되지 않았다. 본 연구는 도시 특유의 이용 · 배분 차원과 생태적 상태 · 비서비스 축이 모두 도시녹지 평가 문헌에서 실제 측정 대상으로 다루어져 왔음을 문헌 근거로 확인함으로써, 이들 차원을 평가 체계에 포함하는 설계에 경험적 정당성을 제공한다. 이는 도시녹지 평가 체계 논의를 규범적 주장에서 경험적 근거의 단계로 이동시킨다.

넷째, 본 체계는 CICES와 같은 기존 생태계서비스 분류체계를 대체하기보다 보완하며, 특히 공간계획 단계의 기능 진단을 위한 참조 틀로 활용될 수 있다. 최종 생태계서비스를 분류 · 집계할 필요가 있는 경우에는 CICES를 활용하고, 개별 녹지의 기능적 성격과 그 공간적 분포를 진단할 필요가 있는 경우에는 본 체계를 병행할 수 있다. 본 연구가 제시한 24개 기능과 23개 측정도메인의 대응 관계, 핵심 · 보조 지표의 구분 및 문헌 기반의 빈도 · 고유성 정보는 지표 후보의 우선순위를 검토하기 위한 공통 참조점이 된다. 이를 공간계획에 적용할 때에는 개별 녹지 단위에서 측정도메인별 지표값을 산출하고, 기능별 핵심 · 보조 지표를 조합하여 기능 수행의 잠재성 또는 상대적 수준을 비교할 수 있다. 23개 측정도메인 가운데 식생구조(수관피복률 · NDVI), 면적 · 유형, 경관구조 및 토지피복 · 도시화 관련 지표는 국토위성 및 항공 · 위성영상, 환경부 토지피복지도, 산림청 임상도, 국가공간정보 등으로 상당 부분 산출하거나 대리지표로 활용할 수 있다. 보행 접근성은 도로 · 보행 네트워크 자료를, 기후 · 열 도메인은 열적외선 영상이나 도시 기상 · 열환경 자료를 추가로 필요로 한다. 반면 생물다양성 · 토양 · 소음 등은 현장조사 또는 별도 관측 자료가 요구되므로, 자료 가용성에 따라 우선 적용 가능한 도메인과 추가 조사가 필요한 도메인을 구분할 수 있다. 이와 같이 공간 단위별 기능 수행 양상을 집계 · 지도화하면 기능의 총량뿐 아니라 도시 내 공간적 분포와 편재를 함께 진단할 수 있으며, 기능 취약지와 보완 우선지역을 식별하는 계획 지원 자료로 활용될 수 있다.

다섯째, 본 체계는 법정 유형을 기능적 관점에서 재해석하고, 비공식 녹지를 포괄적으로 평가하기 위한 토대를 제공한다. 본 체계는 공간의 형태나 법적 지위 자체가 아니라 측정 가능한 지표를 통해 기능을 진단하므로, 도시공원 · 법정 녹지뿐 아니라 하천 · 수변 식생, 가로수, 유휴지 등에도 공통의 기능-지표 틀을 적용할 수 있다. 다만 식생이 없는 나지는 현재의 녹지 기능을 평가하는 대상이라기보다 녹화 전후의 기능 변화 또는 녹지 조성 잠재성을 검토하는 대상으로 구분할 필요가 있다. 이러한 접근은 동일한 법정 유형에 속하더라도 입지, 식생구조, 주변 토지이용 및 이용 여건에 따라 실제 수행 기능이 다를 수 있음을 드러낸다. 예컨대 완충녹지는 입지와 식생구조에 따라 대기 · 음환경 조절(F1)과 미기후 조절(F2)의 잠재성을 우선적으로 점검할 수 있으며, 연결녹지는 생물 · 서식 지지(F4)를 중심으로, 보행 접근성과 이용 여건이 갖추어진 경우 이용 · 사회 · 문화(F6)의 기능을 함께 평가할 수 있다. 근린공원 역시 이용 · 사회 · 문화 기능뿐 아니라 수관구조와 열환경, 서식처 조건에 따라 F2 · F4 · F6의 복합적 기

능을 비교할 수 있다. 절차적으로는 공원녹지기본계획의 현황 및 여건 진단 단계에서 법정 유형별 면적 집계를 넘어 기능군별 지표값과 공간적 분포를 분석하고, 이후 기능 취약지의 보완과 녹지축 연결 우선순위를 설정하는 단계의 기초자료로 활용할 수 있다. 본 체계는 향후 실제 녹지의 기능 프로파일 기반 유형화와 유형별 관리 우선과제 설정을 검토하기 위한 기초 참조 틀을 제공한다. 다만 이러한 국내 적용은 국제 문헌에서 도출된 체계를 곧바로 이식하는 것을 뜻하지 않으며, 국문 문헌과 정책 문서, 국내 자료 여건을 포함한 후속 검토를 통해 보정·검증되어야 한다. 본 연구의 의의는 그러한 국내 적용과 검증을 위한 기능–지표 참조 토대를 제시한 데 있다.

4.3 연구 한계 및 향후 과제

본 연구는 다음과 같은 한계를 가지며, 이는 후속 연구의 과제로 남는다.

첫째, 자료 수집 범위의 한계이다. 본 연구는 Web of Science와 Scopus에 수록된 2005–2025년 영어 학술논문으로 검색 범위를 한정하였다. 이는 문헌의 질적 신뢰성과 검색의 재현성을 확보하기 위한 설계였으나, 국내 학술지 논문, 정책보고서, 지침서 등 회색문헌과 비영어권 문헌이 배제되어 언어·수록 편향이 존재한다. 특히 한국의 도시녹지 평가 관행과 제도적 맥락은 국문 문헌과 행정 지침에 축적되어 있는 부분이 적지 않으므로, 본 체계를 국내 제도에 직접 적용하기에 앞서 국문 문헌과 정책 문서를 포함한 확장 고찰이 필요하다. 또한 검색어를 '도시녹지'로 조작화한 개념군에 의존하였으므로, 동일한 기능을 다루되 상이한 용어(예: 옥상녹화, 도시농업, 하천 복원)를 사용한 문헌이 누락되었을 가능성이 있다.

둘째, 추출 및 표준화 과정에 연구자의 해석이 개입하며, 그 신뢰도가 정량적으로 검증되지 않았다는 점이다. 기능–지표 연결의 추출은 원문 판독에 기반하고, 표기 이질성을 대표어로 통합하는 표준화 역시 의미 유사성에 대한 연구자 판단을 요한다. 본 연구는 3인의 연구자가 레코드를 분담하고 대규모 언어모델을 보조 도구로 활용하되 최종 판정은 연구자가 수행하는 절차를 취하였으나, 이 과정의 신뢰도를 두 층위에서 정량적으로 검증하지는 못하였다. 하나는 연구자 간 층위로, 동일 레코드를 복수의 연구자가 독립적으로 판독하여 코더 간 일치도를 산출하는 교차검증을 수행하지 않았다. 본 연구에서 3인의 연구자는 방대한 문헌량을 고려하여 레코드를 상호 배타적으로 분담하였으므로, 동일 레코드에 대한 중복 판독 자료가 확보되지 않아 사후적으로 일치도를 산출하기 어렵다. 다른 하나는 모델–연구자 층위로, 대규모 언어모델이 제시한 사전 라벨을 연구자의 최종 판정과 대조하여 정밀도·재현율을 산출하는 성능 검증을 수행하지 않았다. 모델의 라벨은 연구자 판독을 지원하는 참고 정보로만 사용되었고 포함·제외의 최종 결정은 전적으로 연구자가 내렸으므로 라벨링 결과 자체의 타당성은 연구자 판단에 의해 담보되나, 모델 보조가 판독의 효율과 일관성에 기여한 정도를 정량적으로 제시하지는 못하였다. 따라서 향후 연구에서는 레코드의 일부를 복수 연구자가 독립 판독하여 코더 간 신뢰도를 보고하고, 모델 사전 라벨과 연구자 최종 판정을 대조하여 정밀도·재현율 등 성능 지표를 함께 제시하는 검증 절차를 설계에 명시적으로 포함할 필요가 있다.

셋째, 본 연구의 가중치는 문헌에서 관측된 지표 사용 관행을 요약한 것으로, 지표의 측정 타당도나 기능에 대한 실제 기여도를 뜻하지 않는다. 특정 지표의 높은 가중은 그 지표가 해당 기능을 가장 타당하게 측정한다는 의미가 아니라, 기존 연구에서 그 기능을 측정하는 데 가장 빈번하고 고유하게 사용되어 왔음을 뜻한다. 또한 본 연구는 가중치 산정까지를 범위로 하여, 척도와 단위가 상이한 지표 측정값을 가중합에 투입하기 위한 정규화 절차는 제안하지 못하였다. 아울러 기능–지표 체계의 구축에 범위를 한정하였으므로, 이를 실제 도시녹지에 적용하여 산출한 기능 점수가 현장의 기능적 실체와 부합하는지는 검증되지 않았다. 이에 후속 연구에서는 본 가중치를 전문가 델파이·AHP 등 규범적 가중치와 결합하고, 측정값을 공통 척도로 변환하는 정규화 방식을 함께 제안할 필요가 있다.

넷째, 실증 적용을 통한 검증이 수행되지 않았다는 점이다. 본 연구는 문헌 고찰을 통해 기능–지표 체계를 구축하는 데까지를 범위로 하였으며, 이를 실제 도시녹지에 적용하여 기능 수행 양상을 산출하고 그 결과가 현장의 기능적 실체와 부합하는지를 검증하지는 않았다. 향후 연구에서는 특정 도시를 대상으로 개별 녹지의 측정도메인별 지표값을 산출·표준화하여 기능 프로파일을 구축하고, 현장조사 또는 독립 관측자료와의 비교를 통해 그 타당성을 검증할 필요가 있다. 이때 본 연구에서 제시한 기능군은 녹지 유형 자체가 아니므로, 검증된 기능 프로파일을 바탕으로 유사한 기능 수행 양상을 보이는 녹지를 별도로 유형화할 필요가 있다. 이어 각 유형의 입지, 식생구조, 이용압력 및 관리 여건을 함께 비교함으로써 기능의 취약성·중복성에 따른 관리 목표, 유지·개선 대상 및 보완 우선순위를 검토할 수 있다. 이러한 접근은 법정 유형이나 면적 중심의 획일적 관리에 기능적 진단을 보완하는 기초자료가 될 수 있다. 다만 본 연구의 문헌 기반 체계만으로 특정 관리방안의 효과를 판단할 수는 없으므로, 후속 연구에서는 유형별 관리 개입과 기능 변화의 관계를 장기 모니터링을 통해 검증할 필요가 있다. 이와 함께 각 지표의

실측 자료 가용성과 산출 비용을 검토하여, 문헌에서 도출된 지표 체계와 실무에서 적용 가능한 지표 체계 사이의 간극을 확인하는 작업이 요구된다.

References

1. 김예성, 김현, 고진수(2014) 도시녹지 유형에 따른 도시민의 이용 특성 연구: 수원시를 대상으로. 한국조경학회지 42(5): 31-40.
2. 김은영, 김지연, 정혜진, 송원경(2017) 도시공원의 생태계서비스 평가지표 개발 및 측정가능성 검토. 한국환경영향평가 26(4): 227-241.
3. 황해권, 손용훈(2026) 도시녹지 분류체계의 법·제도적 개선 방향 연구: 한국, 일본, 싱가포르, 영국의 비교. 한국조경학회지 54(1): 170-187.
4. Aram, F., E. H. García, E. Solgi and S. Mansournia(2019) Urban green space cooling effect in cities. Heliyon 5(4).
5. Benedict, M. A. and E. T. McMahon(2006) Green infrastructure: Linking landscapes and communities. Island Press.
6. Bolund, P. and S. Hunhammar(1999) Ecosystem services in urban areas. Ecological Economics 29(2): 293-301.
7. Boyd, J. and S. Banzhaf(2007) What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63(2-3): 616-626.
8. Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton and M. van den Belt(1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387(6630): 253-260.
9. Czúcz, B., H. Keith, J. Maes, A. Driver, B. Jackson, E. Nicholson, M. Kiss and C. Obst(2021) Selection criteria for ecosystem condition indicators. Ecological Indicators 133: 108376.
10. de Groot, R. S., M. A. Wilson and R. M. J. Boumans(2002) A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics 41(3): 393-408.
11. de Groot, R. S., R. Alkemade, L. Braat, L. Hein and L. Willemen(2010) Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. Ecological Complexity 7(3): 260-272.
12. Dick, J., P. Verweij, E. Carmen, R. Rodela and C. Andrews(2017) Testing the ecosystem service cascade framework and QUICKScan software tool in the context of land use planning in Glenlivet Estate Scotland. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management 13(2): 12-25.
13. Dickinson, D. C. and R. J. Hobbs(2017) Cultural ecosystem services: Characteristics, challenges and lessons for urban green space research. Ecosystem Services 25: 179-194.
14. Elmqvist, T., H. Setälä, S. N. Handel, S. van der Ploeg, J. Aronson, J. N. Blignaut, E. Gómez-Baggethun, D. J. Nowak, J. Kronenberg and R. de Groot(2015) Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. Current Opinion in Environmental Sustainability 14: 101-108.
15. Feld, C. K., P. Martins da Silva, J. Paulo Sousa, F. De Bello, R. Bugter, U. Grandin, D. Hering, S. Lavorel, O. Mountford, I. Pardo, M. Pärtel, J. Römbke, L. Sandin, K. B. Jones and P. Harrison(2009) Indicators of biodiversity and ecosystem services: a synthesis across ecosystems and spatial scales. Oikos 118(12): 1862-1871.
16. Fisher, B., R. K. Turner and P. Morling(2009) Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics 68(3): 643-653.
17. Gómez-Baggethun, E. and D. N. Barton(2013) Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. Ecological Economics 86: 235-245.
18. Haase, D., N. Larondelle, E. Andersson, M. Artmann, S. Borgström, J. Breuste, E. Gomez-Baggethun, Å. Gren, Z. Hamstead, R. Hansen, N. Kabisch, P. Kremer, J. Langemeyer, E. L. Rall, T. McPhearson, S. Pauleit, S. Qureshi, N. Schwarz, A. Voigt, D. Wurster and T. Elmqvist(2014) A quantitative review of

urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. Ambio 43(4): 413-433.
19. Haines-Young, R.(2023) Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.2 and Guidance on the Application of the Revised Structure.
20. Haines-Young, R. and M. Potschin(2010) The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. In D. Raffaelli and C. Frid eds., Ecosystem ecology: A new synthesis. Cambridge University Press. pp. 110-139.
21. Haines-Young, R. and M. B. Potschin-Young(2018) Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A policy brief. One Ecosystem 3: e27108.
22. Hansen, R. and S. Pauleit(2014) From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. Ambio 43(4): 516-529.
23. Kabisch, N. and D. Haase(2014) Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. Landscape and Urban Planning 122: 129-139.
24. Kabisch, N., N. Frantzeskaki, S. Pauleit, S. Naumann, M. Davis, M. Artmann, D. Haase, S. Knapp, H. Korn, J. Stadler, K. Zaunberger and A. Bonn(2016) Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. Ecology and Society 21(2): 39.
25. Layke, C.(2009) Measuring nature's benefits: A preliminary roadmap for improving ecosystem service indicators. World Resources Institute.
26. Legendre, P. and E. D. Gallagher(2001) Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. Oecologia 129(2): 271-280.
27. Lyytimäki, J. and M. Sipilä(2009) Hopping on one leg: The challenge of ecosystem disservices for urban green management. Urban Forestry & Urban Greening 8(4): 309-315.
28. Maes, J., C. Liquete, A. Teller, M. Erhard, M. L. Paracchini, J. I. Barredo, B. Grizzetti, A. Cardoso, F. Somma, J. E. Petersen, A. Meiner, E. Royo Gelabert, N. Zal, P. Kristensen, A. Bastrup-Birk, K. Biala, C. Piroddi, B. Egoh, P. Degeorges, C. Fiorina, F. Santos-Martín, V. Naruševičius, J. Verboven, H. M. Pereira, J. Bengtsson, K. Gocheva, C. Marta-Pedroso, T. Snäll, C. Estreguil, J. San-Miguel-Ayanz, M. Pérez-Soba, A. Grêt-Regamey, A. I. Lillebø, D. Abdul Malak, S. Condé, J. Moen, B. Czúcz, E. G. Drakou, G. Zulian and C. Lavalle(2016) An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. Ecosystem Services 17: 14-23.
29. Millennium Ecosystem Assessment(2005) Ecosystems and human well-being. Island Press.
30. Monti, S., P. Tamayo, J. Mesirov and T. Golub(2003) Consensus clustering: A resampling-based method for class discovery and visualization of gene expression microarray data. Machine Learning 52(1): 91-118.
31. Mouchet, M. A., P. Lamarque, B. Martín-López, E. Crouzat, P. Gos, C. Byczek and S. Lavorel(2014) An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services. Global Environmental Change 28: 298-308.
32. Page, M. J., J. E. McKenzie, P. M. Bossuyt, I. Boutron, T. C. Hoffmann, C. D. Mulrow, L. Shamseer, J. M. Tetzlaff, E. A. Akl, S. E. Brennan, R. Chou, J. Glanville, J. M. Grimshaw, A. Hróbjartsson, M. M. Lalu, T. Li, E. W. Loder, E. Mayo-Wilson, S. McDonald, L. A. McGuinness, L. A. Stewart, J. Thomas, A. C. Tricco, V. A. Welch, P. Whiting and D. Moher(2021) The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline For Reporting Systematic Reviews. BMJ 372.
33. Potschin-Young, M., R. Haines-Young, C. Görg, U. Heink, K. Jax and C. Schleyer(2018) Understanding the role of conceptual frameworks: Reading the ecosystem service cascade. Ecosystem Services 29: 428-440.
34. Raudsepp-Hearne, C., D. G. Peterson and M. E. Bennett(2010) Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences 107(11): 5242-5247.
35. Rupprecht, C. D. D. and J. A. Byrne(2014) Informal urban greenspace: A typology and trilingual systematic review of its role for urban residents and trends in the literature. Urban Forestry & Urban

Greening 13(4): 597-611.
36. Salton, G. and C. Buckley(1988) Term-weighting approaches in automatic text retrieval. Information Processing & Management 24(5): 513-523.
37. Shackleton, C. M., S. Ruwanza, G. K. Sinasson Sanni, S. Bennett, P. De Lacy, R. Modipa, N. Mtati, M. Sachikonye and G. Thondhlana(2016) Unpacking Pandora's box: Understanding and categorising ecosystem disservices for environmental management and human wellbeing. Ecosystems 19(4): 587-600.
38. Singh, V. K., P. Singh, M. Karmakar, J. Leta and P. Mayr(2021) The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. Scientometrics 126(6): 5113-5142.
39. Tzoulas, K., K. Korpela, S. Venn, V. Yli-Pelkonen, A. Kaźmierczak, J. Niemelä and P. James(2007) Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. Landscape and Urban Planning 81(3): 167-178.
40. Von Döhren, P. and D. Haase(2015) Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. Ecological Indicators 52: 490-497.
41. Ward Jr, J. H.(1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. Journal of the American Statistical Association 58(301): 236-244.
42. Wolch, J. R., J. Byrne and J. P. Newell(2014) Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities 'just green enough'. Landscape and Urban Planning 125: 234-244.

Appendix

부록 1. 군집 방법에 관한 보완 분석

1.1 거리 정의에 대한 민감도 분석

본문의 군집분석은 행 정규화된 지표 사용 비율 벡터에 유클리드 거리와 Ward 연결법을 적용하였다. 행 정규화 자료는 각 행의 성분 합이 1로 고정되는 조성적(compositional) 성격을 가지므로, 그 거리 구조가 특정 변환에 의존하지 않는지를 확인하기 위해 Hellinger 변환(비율의 제곱근) 후 동일 절차를 적용한 민감도 분석을 수행하였다(Legendre and Gallagher, 2001). k = 7 절단에서 제안 기능군이 하나의 군집으로 유지되는 정도를 비교한 결과는 표 A와 같다.

분석 결과, 견고한 경험적 군집인 F4는 두 방법에서 완전히 동일하게 유지되었고, F6은 변환 후 유지도가 오히려 상승하였다(71% → 86%). 특히 F1에서는 Hellinger 변환 후 탄소격리 · 기후변화완화와 대기정화 사이의 측정상 근접성은 확인되었으나, 소음저감은 분리되었다. 따라서 F1 전체는 견고한 통계적 군집이라기보다 비생물적 환경 조절이라는 개념적 공통성에 근거한 해석적 기능군으로 해석하였다. 두 군집해의 전체 일치도는 조정 랜드 지수(ARI) 0.32였으며, 제안 배정에 대한 정합도는 오히려 Hellinger 변환에서 더 높았다(원본 0.25 대 Hellinger 0.46).

이러한 결과는 본 자료가 절대적 경계를 갖는 경성 군집을 형성하기보다 지표 사용 양상이 연속적으로 중첩되는

표 A. 거리 정의에 따른 기능군 유지도(k = 7)

기능군	구성 기능	원본 유지도(%)	Hellinger 유지도(%)	해석
F1	탄소격리 · 기후변화완화, 대기정화, 소음저감	33	67	변환 시 탄소격리 · 기후변화완화와 대기가 결합(개념적 배정을 부분지지)
F3	수문조절 · 홍수예방, 수질정화 · 수자원조절, 토양보전 · 침식조절, 영양순환 · 생태순환	50	75	변환 후 수문조절 · 홍수예방, 수질정화 · 수자원조절과 토양보전 · 침식조절 결속 강화
F4	서식지제공 · 생물다양성지지, 생태계 안정성 · 회복력, 식생구조 · 생태 건전성	100	100	거리 정의와 무관하게 단일 군집 유지
F5	원료 · 목재 공급, 식량생산, 수자원 공급	100	67	수자원 공급(n=4)만 이탈, 원료 · 목재 공급과 식량생산은 유지
F6	휴양 · 여가 등 7개 이용 · 문화 기능	71	86	변환 후 유지도 상승

*F5의 유지도 저하는 세 기능 전체가 아니라 수자원 공급(n=4) 한 기능의 이탈에 기인한다.

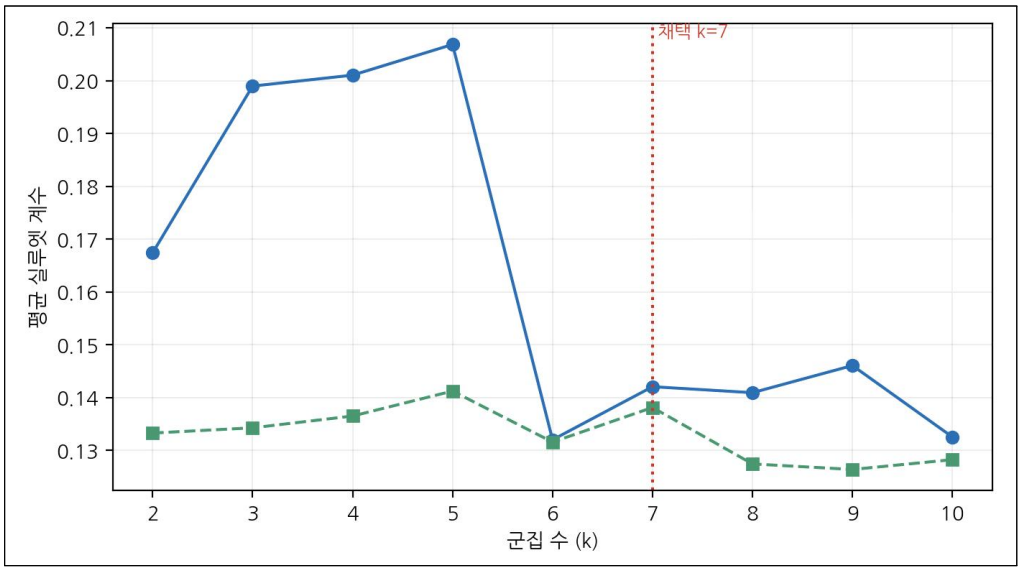


그림 A. 군집 수 결정을 위한 실루엣 계수
범례: 행 정규화 + 유클리드(본문)
Hellinger 변환 + 유클리드

구조를 가지며, 그렇기에 본 연구가 단일 군집 알고리즘의 출력이 아니라 배정 규칙(경험적 안정성 1차, 개념적 정합성 2차)에 따라 최종 기능군을 확정하였음을 뒷받침한다. 아울러 본 행렬은 종-다도(abundance) 자료와 달리 0이 '해당 도메인을 사용하지 않음'이라는 정보를 갖는 지표 사용 프로파일이라는 점에서, 생태 군집분석의 이중 0 회피 논리가 그대로 적용되지는 않는다.

1.2 군집 수(k) 선택을 위한 정량 검토

군집 수는 k = 2–10 구간에서 평균 실루엣 계수를 산출하여 검토하였다(그림 A 참조). 실루엣 계수는 k = 5 부근에서 상대적으로 높았으나(최대 0.207) 전 구간에서 낮은 수준(0.13–0.21)에 머물러, 본 자료가 뚜렷이 분리되는 소수의 군집보다 연속적으로 중첩되는 구조를 가짐을 보여준다.

실루엣 계수가 상대적으로 높은 k = 5 부근의 해상도는 물질 산출(공급)·환경 조절·생태 상태·인간 이용이라는 대분류 수준에 해당하였다. 본 연구는 기능별 지표체계의 세부 측정계열을 검토하기 위해 k = 7을 분석적 절단 수준으로 채택하였다. 따라서 k = 7은 통계적으로 최적화된 군집 수라기보다 최종 배정 규칙 적용을 위한 분석 해상도이다. 이에 본 연구의 최종 분류는 단일 절단 수준에 종속된 경성 군집이라기보다, 군집 구조와 배정 규칙을 결합하여 구성한 해석적 분류로 해석하였다.