

서울시 보호지역의 생물다양성 증진을 위한 공간 관리 모형 연구[†]

- 백사실계곡 생태·경관보전지역을 대상으로 -

A Study on Spatial Management Models for Enhancing Biodiversity in Protected Areas of Seoul[†]
- A Case Study of the Baeksasil Valley Ecological and Landscape Conservation Areas -

노효재*, 한봉호**, 박석철***

*서울시립대학교 일반대학원 조경학과 석사, **서울시립대학교 조경학과 교수, ***서울시립대학교 도시과학연구원 연구원

Roh, Hyo-Jae*, Han, Bong-Ho**, Park, Seok-Cheol***

*Master, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, University of Seoul

**Professor, Dept. of Landscape Architecture, University of Seoul

***Researcher, Institute of Urban Science, University of Seoul

Received: June 4, 2026

Revised: July 2, 2026 (1st)

July 23, 2026 (2nd)

Accepted: July 23, 2026

3인익명 심사필

Corresponding author :

Bong-Ho Han

Professor, Dept. of Landscape
Architecture, University of Seoul,
Seoul 02504, Korea

Tel.: +82-2-6490-5521

E-mail: hanho87@uos.ac.kr

국문초록

본 연구는 서울시 보호지역의 적정 보전 및 이용을 위해 환경생태적 특성과 사회·문화적 특성을 반영한 공간 관리 모형 및 관리방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 환경생태계 현황을 반영함과 동시에 최소한의 비용으로 효율적인 zoning을 돕는 Marxan with zones를 활용하였다. 백사실계곡 생태·경관보전지역은 백석동천 별서터를 중심의 핵심구역과 계곡 상류부의 경작지 일대와 수계를 포함한 완충구역으로 지정·관리되고 있다. 야생동물은 계곡 전 지역에 법정 보호종인 도롱뇽과 무당개구리를 포함하여 청개구리, 계곡산개구리 등이 관찰되고 있었다. Marxan with zones 분석을 위한 계획단위 설정 시 일차적으로 유역권을 기준으로 구분하였으며, 세부적인 분석이 필요하여 현존식생으로 최종 구분하였다. 맵핑 지표로는 비용에 해당하는 역비오톱지수, 역계곡과의거리지수, 역생물종지수, 이용지수와 특성지표에 해당하는 생물종 출현위치 및 종수를 선정하고 데이터를 구축하였다. 구역(zoning)은 핵심 구역, 완충구역, 협력구역으로 설정하였으며, 대상지별 구역 설정 시나리오는 핵심구역 기준을 각각 70%, 50%, 30%로 달리하여 3개 안을 작성하였다. 분석 결과, 핵심구역 목표 비율을 50% 이상으로 설정한 시나리오 2가 보전과 이용의 균형 측면에서 가장 적절한 것으로 도출되었다. 시나리오 2의 대안 중 공간적 응집(compactness)과 연결성 비용(CM = 0.1)을 고려한 최종안을 선정한 결과, 전체 비오톱 I 등급지 면적의 87.1%가 핵심구역 내에 포함되었으며, 특히 법정보호종 출현지와 자연 계곡의 100%, 비오톱 I 등급 산림의 73.8%가 핵심구역(총 145,054m²)으로 확보되었다. 본 연구에서는 최종안의 핵심구역과 환경생태계 현황을 중첩하여 보호지역의 세부 관리방안을 제시하였다.

주제어: 비오톱, 환경생태적 지표, 구역, 핵심구역, 관리계획

ABSTRACT

This study aimed to propose a spatial management model and plan that reflects the environmental-ecological and socio-cultural characteristics of protected areas for the proper conservation and use of the protected areas in Seoul. The study utilized the decision-making program Marxan with Zones, which helped perform efficient zoning with minimal costs while incorporating the environmental-ecological status. The Baeksasil Valley Ecological and Landscape Conservation Area is designated with a core conservation zone around Baeksokdongcheon Byeolseoter and a buffer zone, including cultivated areas and watercourses in the upper valley. The valley, located at the center of a highly urbanized area (Neunggeum Village), and Baeksokdongcheon, a Scenic Site (No. 36), and the center of the core conservation zone, are major factors contributing to the high visitor numbers with the associated ecological impacts. Wildlife, including protected species such as Hynobius leechii and Bombina orientalis, as well as Dryophytes japonicus and Rana huanrensis, were continuously observed throughout the valley. Particularly, the Hynobius leechii species were present in various forms, from eggs to adults. The Baeksasil Valley Ecological and Landscape Conservation Area has five entry points: Hyeontongsa, Pyeongchang-dong, Bulam-dong, Bukak Skyway, and Neunggeum Village, with most visitors entering through Bulam-dong. Inside the conservation area, there are three historical and cultural

[†]이 논문은 2025년도 서울시립대학교
연구년교수 연구비에 의하여 연구되었
음.

sites: Detached residence site and Pond, Wolam, and the historic locations of Baeksukdongcheon. Except for Wolam, these sites are accessible by constructed trails, and the areas around Detached residence site and Pond, with benches and flat terrain, have the highest visitor frequency. The Baeksasil Valley Ecological and Landscape Conservation Area requires a planning unit method for small-scale urban protected areas, but has not been well addressed by the existing Marxan with Zones program. The planning units were initially divided based on the watershed, followed by detailed analysis, which led to the final zoning classification based on existing vegetation. The mapping indicators selected for the analysis included ecological cost factors, such as Biotope Index, Distance to Valley Index, Species Index, Usage Index, and biodiversity indicators, such as species appearance location and species count. The Marxan with Zones analysis resulted in zoning that included core areas, buffer zones, and cooperation zones. Various zoning scenarios were created by adjusting the core area percentage to 70%, 50%, and 30%. The analysis revealed that Scenario 2, which set the core area target at 50% or more, was the most optimal in balancing conservation and utilization. By selecting the plan considering spatial compactness and connectivity cost ($CM = 0.1$) from Scenario 2, 87.1% of the total Grade biotope area was included within the core zone. Specifically, 100% of the habitats for legally protected species and natural valleys, along with 73.8% of the Grade 1 biotope forests, were secured as the core zone (totaling 145,054m²). After refining and selecting the final plan, core areas were overlapped with the environmental ecological status to formulate a comprehensive management plan.

Keywords: Biotope, Environmental Ecological Indicators, Zoning, Core Area, Management Plan

1. 서론

서울시는 과밀 개발로 인한 기상변화 및 환경오염, 생물다양성 감소 등의 문제에 직면하고 있다. 이에 서울시는 1999년 서울특별시 자연환경보전조례를 제정하여 보전 가치가 높은 지역을 보호하고 있다(서울시, 2012). 서울시의 생태·경관보전지역은 2026년 기준 총 18개소, 5,244,318m²를 지정 관리하고 있다.

백사실계곡 생태·경관보전지역은 2012년 지정된 이후 총 3차례 정밀변화관찰 연구를 진행하였다(서울시, 2025). 백사실계곡은 도롱뇽 집단 산란지, 다양한 딱따구리 서식지, 계곡 암반 및 느티나무 군락 등 우수한 자연경관, 서울 부암동 백석동천(명승 제36호) 입지 등의 생태·문화적 가치가 있다. 최근 급격한 기후 변화, 계곡 수계 내 오염원 유입, 명승지 주변 높은 이용강도 등으로 도롱뇽의 개체수가 감소하는 추세를 보인다. 또한 종로구청에서 백사실계곡 명승지의 복원 사업을 추진하고자 하여 대상지 관련 이해관계가 더욱 복잡해질 것으로 예측되었다.

보호지역 지정 및 관리, 생태계 관리구역 설정 관련 연구는 GIS 분석, 생물다양성 지표 개발, 생태계 서비스 평가, 시나리오 기반 모델링 등 다양한 방법론이 활용되고 있으며(김근한 등, 2017; 강성룡 등, 2023), 보전지역 설정, 생물서식공간 설정 등을 통한 관리방안 수립 연구가 있었다(윤호근 등, 2020; 박수영 등, 2024).

서울시 생태·경관보전지역은 적절한 보전 및 이용을 위한 공간 관리 모형이 부재한 상태이다. 이를 위해 공간적 특성, 생태적 특성, 생물학적 건강 상태, 경제적·사회적 이득, 잠재력 영향 예측 및 분석 등이 필요하다.

Marxan with zones는 보전 목표(target)를 달성하면서 동시에 전체 비용(지구 배치 비용 및 연결성 비용 등)을 최소화하는 다중 목적함수(objective function)를 풀어낸다. 특히 관리구역별 상충하는 이용 압력과 생태적 가치를 동시에 조율할 수 있는 장점이 있어 복합적인 토지이용이 이루어지는 도시생태계 보전계획에 적합하다. 따라서 Marxan with zones는 복합적인 보전 계획 문제를 해결하고, 최소한의 비용으로 정량적인 보전 목표를 달성할 수 있도록 지원하며, 대규모 보전계획에서 실현 가능한 해결책을 제시하는 데 유용하다(Watts et al., 2009; Ardron et al., 2010). 또한 분석된 대안들을 통해 보전 우선순위가 높은 지역을 파악할 수 있다(Klein et al., 2008). Marxan with zones 분석이 입력되는 공간 데이터의 해상도와 설정된 비용(cost) 및 타겟(target) 매개변수에 결과가 민감하게 반응하는 한계가 있어, 본 연구에서는 민감도 분석과 다중 시나리오 비교를 수행하였다. 이는 시나리오 분석을 통해 정책 결정자가 집중형 보전과 분산형 보전 중 대상지 여건에 적합한 실효성 있는 대안을 선택할 수 있도록 과학적 근거를 제공하고자 하였다.

백사실계곡 생태·경관보전지역은 시가지지역으로 둘러싸여 있으며 생물종 및 경관의 자연 생태 보전을 위한 지역이면서, 역사적 가치가 높고, 인근 시민들에게 휴양적 기능을 하는 산림으로 지속적인 이용이 발생하는 복잡한

공간이다. Marxan with zones를 활용하여 보다 객관적이고 과학적인 근거(현장조사 자료)를 바탕으로 관리구역의 최적안을 도출할 경우 이해관계자들의 합의와 조정하는 과정에 활용할 수 있다.

연구 목적은 백사실계곡 생태·경관보전지역을 대상으로 적정 보전 및 이용을 위해 환경생태적 특성과 사회·문화적 특성을 반영한 공간 관리 모형 및 관리방안을 제시하고자 하였다.

2. 조사분석 방법

2.1 무기환경

무기환경 분석은 계획단위 설정을 위하여 유역권 및 수계, 지형구조를 분석하였다. 유역권 및 수계 분석은 1/1,000 수치지형도를 활용하였다. 수계 분석은 QGIS 3.3.4 Program 중 Flow direction tool을 이용하여 수계의 방향을 도출하였고, flow accumulation 명령어를 이용하여 집수구역의 범위를 설정함으로써 수계를 도출하였다. 유역권 분석은 집수되는 지점(pour point)을 지정 후 watershed 명령어를 사용하여 도출하였다. 지형구조는 대상지 내 표고와 경사를 파악하기 위하여 1/1,000 수치지형도를 활용하였다.

2.2 환경생태적 특성

2.2.1 식생구조

생태계 기반환경을 갖춘 공간을 파악하기 위해 산림과 계곡 현존식생 현황을 분석하였다. 현존식생은 현장조사를 실시하여 1/1,000 수치지형도에 면(polygon)으로 작성하였으며, 폴리곤별 속성자료를 야장에 기록하였다. 현존 식생도는 실내에서 유형화 작업을 거쳐 식생 우점종으로 범례를 나누어 QGIS 3.3.4 Program을 통해 도면화하였고, 유형별 면적과 면적비율을 계산하였다. 그리고 현존식생도와 속성자료를 이용하여 비오톱평가를 실시하였고, 비오톱 지수 산정에 적용하였다.

2.2.2 동물서식 특성

동물서식 특성은 지역의 환경조건을 대표할 수 있는 양서류와 야생조류를 조사하였다. 양서류는 수질 오염과 서식지 파편화 등 환경 변화에 매우 민감하게 반응하는 대표적인 환경 지표종(bioindicator)으로 백사실계곡 생태경관보전지역의 지정 사유 중 하나는 도롱뇽 집단 산란지역이다. 야생조류는 도시 환경에서 녹지의 규모와 연결성에 따라 조류 군집이 뚜렷한 차이를 보이기 때문에 도시 보전 및 연결의 평가 대상으로 적합하다. 양서류는 2010년부터 현재까지 주요 생물서식공간으로 기능하는 지점을 파악하기 위해 문헌자료 분석 및 현장조사를 실시하였다. 야생조류는 2010년부터 현재까지 주요 생물서식공간으로 기능하는 지점을 파악하기 위해 야생조류 중 보호종 서식 및 분포현황을 분석하였다. 생물상 조사 자료는 백사실계곡 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구 1~2차보고서(서울시, 2012; 2019)와 2018-2023년 이후부터는 백사실계곡 생태·경관보전지역 일반변화관찰 종합 보고서를 활용하여 제작하였다. 야생조류 보호종 분포 현황은 연구대상지 경계로 설정한 범위 내에서 문헌자료 및 현장조사를 실시하여 1/1,000 수치지형도에 출현위치를 점(point)으로 기입하였다. 양서류와 야생조류 현장조사를 통해 작성된 자료를 Autocad와 QGIS 3.3.4 Program에 입력하여 출현현황도를 작성하였다. 이상의 자료는 생물종지수 산정에 적용하였다.

2.3 사회·문화적 특성

사회·문화적 특성은 이용현황, 이용시설, 역사문화자원을 조사하였다. 이용행태 및 이용자 수는 백사실계곡 생태·경관보전지역을 중심으로 기상 조건이 양호한 평일 하루 동안 연구대상지로 진입하는 출입구를 조사 지점으로 설정하였다. 세부 방법으로 일출 후부터 1시간 단위로 이용자 수 및 이용 행태를 기록하여 1/1,000 수치지형도와 야장에 위치 및 속성을 기입하였다. 백사실계곡은 주말의 일화성 방문객보다는 인근 거주민의 반복적인 산책과 휴식이 주된 이용 형태를 나타내기에 평일을 조사일로 선정하였다. 이용 현황 조사는 2024년 6월 16일 06:00-18:00까지 진행하였다. 이용 행태는 휴식, 산책, 반려견 산책, 자연 관찰, 운동, 피크닉, 어린이 놀이, 환경미화, 독서, 자전거 타기, 기타로 구분하였다. 탐방시설 및 역사·문화시설지 현황은 기존 선행연구와 현장 조사를 통해 1/1,000 수치지형도에 역사문화 유적, 수경관, 점경물과 포장 등 백석동천의 역사문화 요소, 시설물 등을 조사하였다. 탐방시설 현황은 휴게시설, 약수터 등의 설치 현황을 조사하고, 1/1,000 수치지형도에 위치를 도면화하였다.

역사·문화자원은 백석동천의 조영자, 조영배경, 조영실제에 대한 내용, 조영자의 신분 사회적 특성 및 사상을 살피기 위한 사례를 국내 문헌을 통해 고찰하였다. 백사실계곡의 역사·문화자원 분포 현황은 기존 선행연구와 현장 조사를 통하여 1/1,000 수치지형도에 역사·문화자원과 경관요소를 도면화하였고, 백석동천의 역사문화 경관 요소, 시설물 등을 조사하였다. 이상의 분석 자료는 이용지수 산정에 적용하였다.

2.4 Marxan with zones 보전지역 설정

2.4.1 계획단위 설정 및 지표 선정

계획단위 설정을 위해 유역권 분석 및 수계를 구분하였고, 맵핑 지표는 선행연구에서 제시한 지표 중 백사실계곡에 적용할 수 있는 지표를 선정하였다. 환경생태적 지표는 도시화지수, 토지파복, 경사도지수, 비오톱지수, 생태자연도, 동물상(멸종위기야생생물), 경관자원분포 등이 있었으며, 사회·문화적 지표로는 탐방로지수, 탐방 및 관리시설 등이 있었다(모용원 등, 2013; 염정현, 2015; 윤호근 등, 2020; 박수영 등, 2024). 선행연구에서 사용된 맵핑 지표 중 서울시 생태·경관보전지역의 구역 구분을 도출하는 데에 비오톱지수, 동물상은 상관성이 있으며, 도심 속에 위치하고 있다는 요소와 이용 현황 또한 중요한 요소로 판단하여 비오톱지수, 생물종지수, 이용지수를 공간 분석 맵핑 지표로 선정하였다.

2.4.2 맵핑 지표별 평가방법

비오톱지수는 1개 유역권에서 작성된 비오톱 폴리곤 면적과 가중치를 곱하여 가중치 면적을 산출하였다. 다음 유역권을 기준으로 산출값을 모두 더한 후 전체면적으로 나누어 비오톱지수를 도출하였다. Marxan with zones 프로그램에서는 지수 수치가 낮을수록 가치가 높게 평가된다. 따라서 지수의 최댓값인 1에서 산출된 비오톱지수를 차감하여 역비오톱지수를 적용하였다. 계곡과의 거리지수는 계획단위별 계곡과의 직선거리를 산출하고 길이값을 나열한 후, 최장 거리 기준으로 나누어 유역권별 계곡과의 거리지수를 산출하였다.

- 비오톱지수 = ((비오톱 면적 × 등급별 가중치) / 유역권 면적)
- 역비오톱지수 = 1(지수의 최댓값) - 비오톱지수(등급별 면적을 통해 산출)

생물종지수는 백사실계곡 생태·경관보전지역 일대 생물종 중 멸종위기야생동물, 천연기념물 및 서울시 보호종인 야생조류와 백사실계곡 생태·경관보전지역의 대표 분류군인 양서류에 한해서 분석하였다. 해당 생물종의 분류군수, 종수를 산정하고 분류군수, 종수를 나열한 후, 5종 이상, 4종, 3종, 2종, 단일종, 관찰되지 않음 등 5개 유형으로 구분하였다.

이용지수는 선(polyline) 데이터인 탐방로와 점(point) 데이터인 탐방 및 관리 시설분포와 시설별 이용 행태, 출입구별 이용객 수를 맵핑하였다. 조사구간을 도별로 이동하면서 탐방로 및 탐방 관리시설 분포 등을 1/1,000 수치지형도 위에 선(polyline) 및 점(point)으로 작성하여 위치를 기록하였고, 시설별 이용 행태 및 출입구별 이용객 수는 시설과 출입구에서 6-19시까지 조사하여 해당 위치가 포함된 유역권에 맵핑하였다. 두 개의 지표 모두 계획단위와 중첩하여 현황을 파악하였다.

2.4.3 구역 구분(zoning) 및 보전지역 맵핑 결과 검증

구역 구분은 Marxan with zones 프로그램을 활용하였으며, 비용발생 정도를 기준으로 최종 분석값인 목적기능값(objective function, score)을 도출하였다(염정현, 2015). 최종안 선정은 도출된 시나리오에 대한 적합성을 검토하여 판단하였다. 검토 내용 1단계는 주요 보호구역이 충분히 확보되었는지, 2단계는 계곡과 인접한 핵심구역이 많은지, 3단계 핵심구역이 분산되어 있지 않고 권역을 형성하고 있는지, 4단계 비오톱 I 등급지인 계획단위가 충분히 포함되어 있는지, 5단계 생물종이 다수 서식하는 계획단위가 포함되어 있는지를 검토하여 최종안을 선정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 계획단위 설정

계획단위는 생태계의 특성을 반영할 수 있는 유역권 단위로 설정하였으나, 대상지 규모가 작은 서울시 생태·경

관보전지역의 특성상 QGIS를 활용한 유역권 구분은 계획단위로 적절하지 않았다. Marxan 모델의 공식 가이드라인(Ardron, 2008)에 따르면, 소규모 대상지에서는 세밀한 공간 데이터를 하위 유역권이나 폴리곤 단위로 세분화하는 것이 데이터의 손실을 방지하고 정확도를 높이는 데 필수적이라고 명시하고 있다. 따라서 소규모 대상지의 생태적 특성이 적절히 반영되기 위해 유역권 분석을 토대로 현장조사 및 분석한 유역권별 현존식생 개념을 적용하여 계획단위를 설정하였다(Davis and Storms, 1966; 박수영 등, 2024). 이는 소규모 대상지의 특성을 반영하여 공간 분석의 해상도를 높이고, 야생동물 서식처로서의 식생 가치를 모델에 정밀하게 반영하기 위함이다. 그 결과 총 319개 단위(units)으로 구분되었다(그림 1 참조).

3.2 맵핑 지표 평가

3.2.1 비오톱지수

비오톱지수가 높은 지역은 대부분의 자연림과 계곡에 해당하였으며, 그중 산림의 비율이 높고 계곡 하류 지역이 주로 해당하였고 계곡과 인접할수록 비오톱지수가 높았다. 비오톱지수가 낮은 지역은 인공림, 도로, 주거지, 특수지역 등이었으며 주로 북쪽 능선 넘어 위치한 산림과 남쪽 용선사 주변 산림, 동쪽 군사시설과 능금마을 내 주거지 및 시설경작지 등이 해당하였다(표 1 참조).

3.2.2 계곡과의 거리지수

유역권별 계곡과의 직선거리를 산출하고 길이값을 나열한 후, 최장 거리 기준으로 나누어 유역권별 계곡과의 거리지수를 산출하였다. 계곡과의 거리가 10m 미만인 유역권은 86개이었으며, 전체의 1.0%인 6,444㎡이었다. 계곡에 인접할수록 서식지가 다양하고 먹이원이 풍부하며 양서류가 서식하기 적합한 환경으로 지수는 0.97 이상을 부여

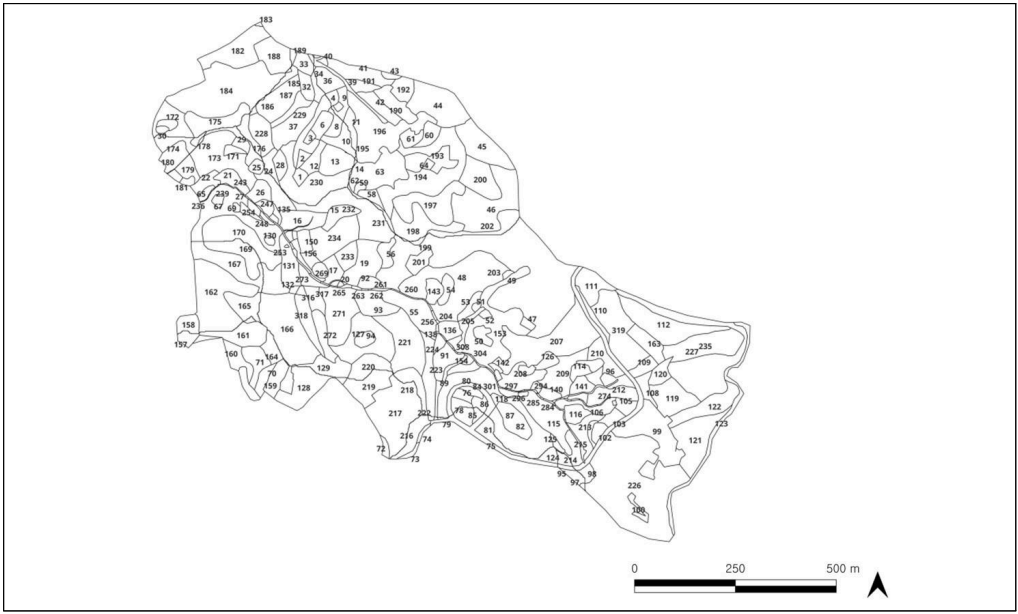


그림 1. 계획단위 설정

표 1. 백사실계곡 비오톱 가중치별 면적 및 비율

비오톱지수	계획단위 개수	평균 지수	면적(㎡)	비율(%)
0.8 이상	58	1.00	166,568	25.1
0.6-0.8	53	0.75	90,709	13.7
0.4-0.6	96	0.50	231,868	34.9
0.2-0.4	50	0.25	73,981	11.1
0.2 미만	62	0.00	101,040	15.2
합계	319	0.50	664,165	100.0

하였다. 10-50m인 유역권은 61개이었으며 전체의 11.9%인 79,313m²이었으며, 지수는 0.88 이상 0.97 미만을 부여하였다. 50-100m인 유역권은 52개이었으며 전체의 22.1%인 146,685m²이었다. 가장 넓게 분포하였으며 지수는 0.75 이상 0.88 미만을 부여하였다(표 2 참조).

3.2.3 생물종지수

4종이 관찰된 유역권은 3개이었으며 지수는 0.6 초과 0.8 이하로 부여하였다. 생물종이 관찰되지 않은 유역권은 192개이었으며 지수는 0.0을 부여하였다. 절반 이상의 유역권에서 보호종이 관찰되지 않았으며 보호종이 주로 출현하는 유역권은 대부분 계곡 주변에 위치한 유역권이 해당되었다(표 3 참조).

3.2.4 이용지수

백사실계곡 생태·경관보전지역 일대 탐방로가 지나가는 계획단위는 111개였다. 그중 이용객 수가 많아 이용 강도가 높은 계획단위 개수는 2개로 전체 면적의 0.1%인 684m²이었다. 이용 강도가 보통인 계획단위 개수는 13개로 전체 면적의 0.1%인 743m²이었다. 이용 강도가 낮은 계획단위는 17개로 전체 면적의 1.7%인 11,573m²이었다. 이용 없는 계획단위는 208개로 가장 많았으며, 전체 면적의 78.5%인 521,509m²으로 자연림을 포함한 대부분 산림과 계곡이 해당하였다. 시가지지역은 이용 강도가 매우 높은 지역으로 이용 현황 조사 없이 현존식생으로 해당 계획단위를 분류하였고, 지수는 0.0을 부여하였다. 보호지역 내부 계곡변 산책로와 역사·문화시설지에서 이용자 수가 많았으며, 이용 행태가 다양하게 나타났다(표 4 참조).

3.3 Marxan with zones을 활용한 보호지역 공간 분석 및 검증

3.3.1 시나리오별 구역 기준 설정

유형별 시나리오 기준은 해당 개체의 공간 이용도를 밀도의 개념으로 표현한 선을 통해 행동권을 도출하는 Kernel 방법의 야생동물 행동권 면적 추정 비율 MAP(minimum area probabilities) 95%, 75%, 50%를 기준으로

표 2. 백사실계곡 계곡과의 거리지수 면적 및 비율

계곡과의 거리지수	구분(m)	계획단위 개수	면적(m ²)	비율(%)
0.97 이상	10 미만	86	6,444	1.0
0.88-0.97	10-50	61	79,313	11.9
0.75-0.88	50-100	52	146,685	22.1
0.62-0.75	100-150	29	120,253	18.1
0.50-0.66	150-200	31	103,919	15.6
0.38-0.50	200-250	24	112,777	17.0
0.25-0.38	250-300	18	41,947	6.3
0.25 미만	300 이상	18	52,829	8.0
합계		319	664,165	100.0

표 3. 백사실계곡 생물종지수 면적 및 비율

생물종지수	구분	계획단위 개수	면적(m ²)	비율(%)
0.80-1.00	5종 이상	1	36,841	5.5
0.60-0.80	4종	3	15,011	2.3
0.40-0.60	3종	9	47,213	7.1
0.20-0.40	2종	18	83,368	12.6
0.00-0.20	단일종	96	177,052	26.7
0.00	관찰되지 않음	192	304,680	45.8
합계		319	664,165	100.0

표 4. 백사실계곡 이용지수 면적 및 비율

구분		계획단위 개수	면적(m ²)	비율(%)
이용 있음 (총 111개)	이용 강도 매우 높음	65	113,301	17.1
	이용 강도 높음	2	684	0.1
	이용 강도 보통	13	743	0.1
	이용 강도 낮음	17	11,573	1.7
	이용 강도 매우 낮음	14	16,355	2.5
이용 없음		208	521,509	78.5
총 합계		319	664,165	100.0

하였다(Worton, 1989). 전체 Target 중 Zone A(핵심구역), Zone B(완충구역)의 합이 MAP의 비율이 되도록 반영하였으며, Zone A의 보전강도를 70%, Zone B 50%, Zone C 30%로 설정하였다(표 5 참조).

각 시나리오는 구역별 각 특성지표(feature)에 대한 목표치를 설정하였다. 설정 비율은 시나리오 설정 범위를 반영하여 양서류 출현지점(1), 비오톱 I 등급지 분포지점(2)은 MAP 비율을 적용하였으며, 현재 분포비율을 고려하여 협력구역을 제외한 핵심구역, 완충구역에 각각 반영하였다.

본 연구의 가중치 설정 및 역지수 적용 방식은 윤호근 등(2020)의 방법론적 틀을 따르고 있다. 지구별 비용(zonecost)파일은 계획단위에 반영된 비오톱지수, 계곡과의 거리지수, 생물종지수, 이용지수 비용발생 값에 가중치를 설정하는 파일이다. negative cost(역가치)를 반영한 역비오톱지수, 역계곡과의 거리지수, 생물종지수는 생태적 가치를 반영하는 핵심지표이며 역이용지수는 시민들의 이용 가치를 반영한 지표이다. 그중 역비오톱지수와 역계곡과의 거리지수는 갑작스럽게 큰 변화가 발생하기 어려운 환경이나 식생과 같은 가치를 반영하는 지표로 1.0의 가중치를 부여하였고, 그에 반해 생물종지수는 같은 생태적 가치를 지녔으나 지속적으로 머물러 있지 않으며 여러 요인으로 갑작스럽게 변화가 발생하기 쉬운 가치를 반영하는 지표로 0.5의 가중치를 부여하였다(이시영 등, 2024; Niemi and McDonald, 2004). 이용지수는 생태적 가치와 정반대되는 개념으로 가중치를 0.20로 설정하였다.

3.3.2 시나리오별 최종안 선정

BLM(boundary length modifier)은 보전지역의 공간적 응집도(compactness)를 조절하는 변수로 값이 클수록 보전지역이 파편화되지 않고 하나로 뭉치게 된다. FPF(feature penalty factor)는 각 생태 지표(보전 목표)를 달성하지 못했을 때 부과되는 벌점 가중치로, 종의 중요도나 희귀성에 따라 차등 부여된다. 시나리오별 보정은 동일한 보정 절차에 따라 분석하되, 핵심구역과 완충구역의 목표 비율을 달리하여 비교하였다. BLM은 구역 간 단절을 줄이면서도 과도한 면적 확장을 방지하는 수준을 탐색하기 위해 후보값을 단계적으로 적용하였다. 반복횟수와 annealing 감소 단위는 목적 기능값의 안정성을 기준으로 검토하였으며, 모든 시나리오에서 1,000,000회 반복과 10,000의 감소 단위를 적용했을 때 목적 기능값이 가장 낮게 나타났다. FPF는 보전특성이 목표량에 미달할 때 발생하는 페널티를 조정하기 위해 사용하였다. 보정 방법은 양서류 보호종 수와 비오톱 I 등급지수를 이용하여 수치를 보정하였다.

Marxan with zones에서 CM(cost multiplier)은 Zonecost 파일(zonecost.dat)을 통해 구현된다. Zoneboundcost는 핵심구역·완충구역·협력구역 사이의 인접 관계가 결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 CM = 0.00001부터 CM = 1까지 단계적으로 검토하였다(표 6 참조). CM은 Marxan with zones에서 각 계획단위(planning unit)를 특정 지구(zone)에 할당할 때 발생하는 비용을 나타내는 행렬이다. CM이 높게 설정될수록 보전 목표를 달성하려는 과정에서 각 지역을 선택하는 비용이 커지므로, 생태적 가치가 높은 핵심적인 지역들이 우선적으로 선택되어 더 효율적이고 집중적인 보전을 가능하게 하며, 보전 영역이 비교적 작고 효율적인 선택을 유도한다.

시나리오 1(목표 핵심구역 비율인 70%)에서 CM = 0.1, 시나리오 2(목표 핵심구역 비율인 50%)에서 CM =

표 5. 유형별 시나리오 설정(단위: %)

시나리오	전체 목표	핵심구역	완충구역	협력구역
1	100	75	25	5
2	100	50	25	25
3	100	30	20	50

표 6. 시나리오별 보정 절차

구분	시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
보호구역 목표(%)	95	75	50
핵심구역 목표(%)	70	50	30
완충구역 목표(%)	25	25	20
최종 BLM	0.001	0.001	0.0001
반복 횟수(회)	1,000,000	1,000,000	1,000,000
감소 단위	10,000	10,000	10,000
검토 CM 범위	0.00001-1	0.00001-1	0.00001-1
최종 후보	CM = 0.1	CM = 0.01, CM = 0.1	CM = 0.1

0.01과 CM = 0.1 두 시나리오, 시나리오 3(목표 핵심구역 비율인 30%)에서 CM = 0.1의 경우를 최적으로 선정하였다(그림 2 참조). 모두 산림 계곡과 핵심구역이 인접하여 있는 시나리오이다. 또한 생태적 가치가 높은 비오톱 I 등급지와 생물종이 많은 계곡 인근에 핵심구역이 집중적으로 분포하여 핵심구역 설정 시 비오톱 I 등급지와 생물서식처의 범위 보전 및 확대가 가능한 시나리오이다.

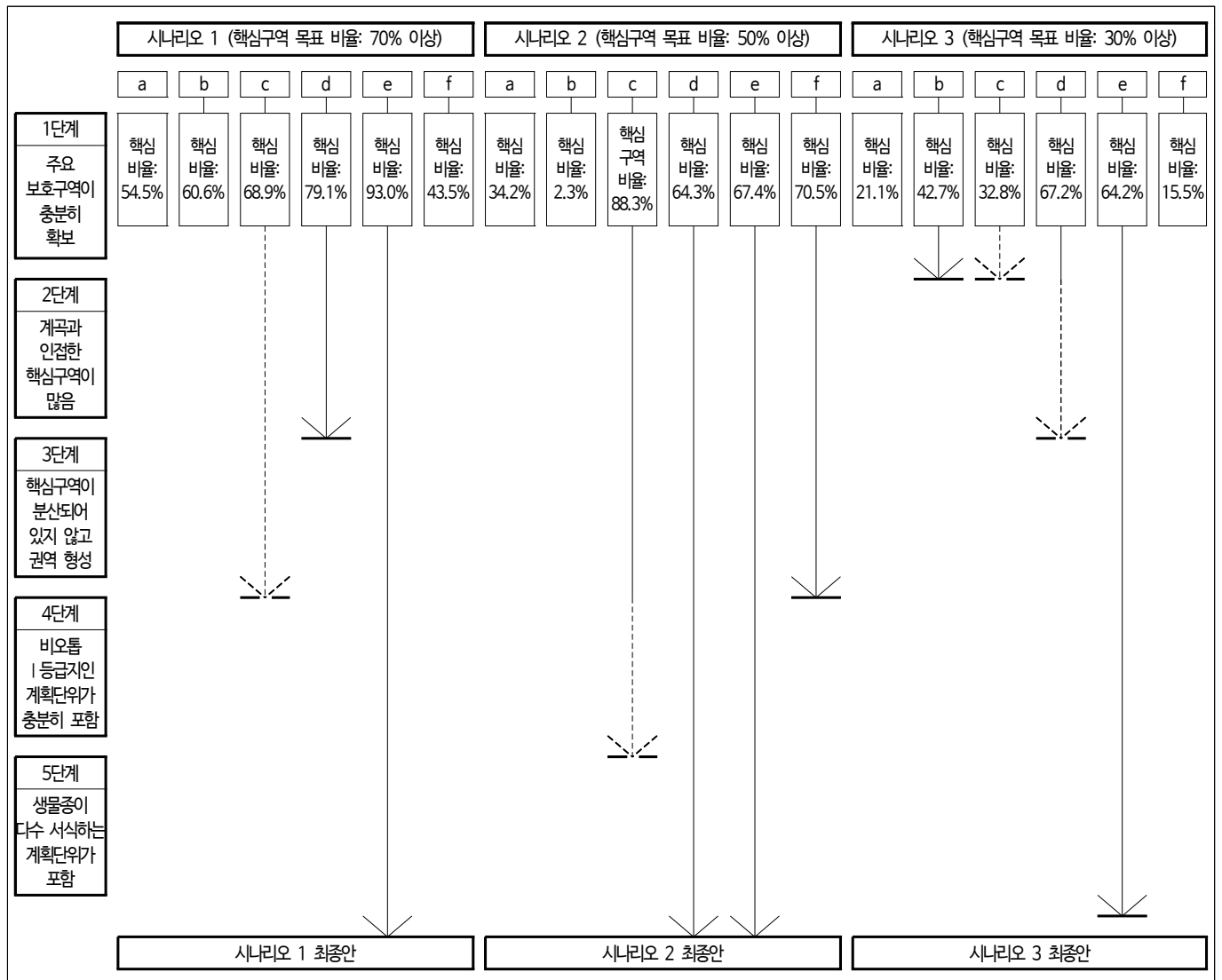


그림 2. 시나리오별 최종안 선정

a: CM = 0.00001, b: CM = 0.0001, c: CM = 0.001, d: CM = 0.01, e: CM = 0.1, f: CM = 1

3.3.3 적정 시나리오 선정 및 검증

시나리오 1 분석 결과 CM = 0.1이 목표 비율을 충족하고 계곡 및 비오톱 I 등급지를 넓게 포함하였으나, 대부분이 핵심구역으로 편입되어 협력구역의 기능이 축소되었다. 이 경우 생태적 보전성은 높아지지만, 기존 주거지·경작지·탐방 이용이 혼재하는 백사실계곡의 관리 현실을 반영하기에는 실행 가능성이 낮다고 판단되었다. 시나리오 2 CM = 0.01과 CM = 0.1 모두 목표 비율을 충족했으며, 계곡 수계와 양서류 출현지, 비오톱 I 등급지가 핵심구역 안에 안정적으로 포함되었다. 두 대안 중 CM = 0.1은 핵심구역이 보다 연속적인 권역으로 형성되고, 비오톱 I 등급지 포함 면적이 상대적으로 넓어 최종안으로 적합하였다. 이는 생태적 중심부를 보호하면서도 이용·복원·협력 관리가 필요한 주변부를 남길 수 있다는 점에서 도시 보호지역 관리목표와 부합한 것으로 판단하였다. 시나리오 3 CM = 0.1이 후보로 도출되었지만, 결과적으로 시나리오 2의 공간 배치와 유사하면서도 핵심구역 목표 설정의 의미가 뚜렷하지 않았다. 또한 주요 서식처와 비오톱 I 등급지를 충분히 포함하지 못하는 문제가 확인되어 최종 관리안으로는 적절하지 않은 것으로 판단되었다.

시나리오 2에서는 CM = 0.01과 CM = 0.1이 최종안으로 선정되었으며 두 시나리오 모두 계곡 인근 산림이 핵심구역으로 설정되었다. 백사실계곡 생태·경관보전지역 외부 북측 산림은 시가화 지역인 평창동과 인접하였으며 등산로가 설치되어 있고 비오톱 I 등급지도 분포하지 않아 협력구역에 포함되었다. 그에 반해 백사실계곡 상류 주변 능금마을과 청운대 인근 군사시설은 시가화 지역임에도 불구하고 능금마을 내부에 백사실계곡이 흐르며 해당 계곡에 양서류가 산란 및 서식하는 모습이 지속적으로 관찰되었으며 능금마을과 군사시설 인근 산림에서는 딱따구리류가 지속적으로 관찰되었다. 또한 능금마을 주변 산림은 일부 비오톱 I 등급지가 분포하여 생태적 가치가 매우 높아 핵심구역에 포함되었다. CM = 0.01과 CM = 0.1은 매우 유사한 결과를 도출하였으나 4단계인 비오톱 I 등급지 포함하는 면적에서 차이가 있었다. 비오톱 I 등급지 중 법정보호종 출현지와 계곡의 면적은 두 시나리오 모두 동일하였으나 CM = 0.01의 경우 현통사 북측 산림에 위치한 비오톱 I 등급지인 다층구조의 참나무류림과 침엽수림을 핵심구역으로 포함하지 않아 CM = 0.1보다 핵심구역에 포함한 비오톱 I 등급지 면적이 적었다. 따라서 시나리오 2를 정적 시나리오로 선정하였으며 그 중 비오톱 I 등급지를 핵심구역에 보다 많이 포함한 연결수치 CM = 0.1인 시나리오를 최종안으로 선정하였다(표 7, 그림 3 참조).

표 7. 백사실계곡 시나리오 2 최종안 핵심구역 내 비오톱 I 등급 면적 및 비율

현존식생 유형			CM = 0.01		CM = 0.1	
대분류	중분류	소분류	면적(m ²)	비율(%)	면적(m ²)	비율(%)
법정보호종 출현지	녹지	법정보호종인 양서류가 출현한 녹지	81,913	58.7	81,913	56.5
산림	자연림	다층구조 참나무류림	28,295	20.3	33,184	22.9
		다층구조 침엽수림	26,871	19.3	27,520	19.0
하천	계곡	자연 계곡	2,438	1.7	2,438	1.7
합계			139,517	100.0	145,055	100.0

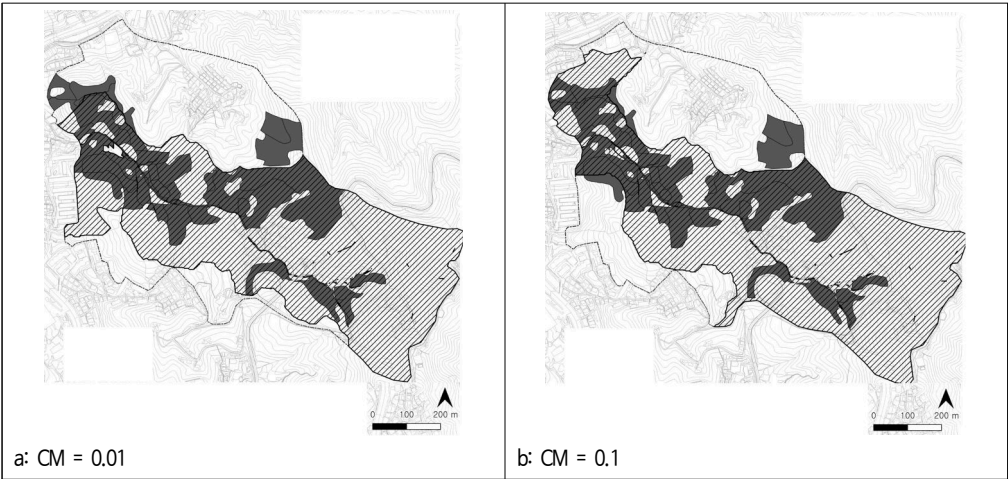


그림 3. 백사실계곡 시나리오 2 최종안 핵심구역 내 비오톱 I 등급 분포도
범례: 핵심구역 비오톱 I 등급

분석 결과 모든 시나리오에서 $CM = 0.1$ 이 적절안으로 도출되었다. $CM(cost\ multiplier)$ 은 보전 목표를 달성하는 데 있어 각 지역을 선택하는 데 드는 비용에 대한 가중치를 조절하는 값으로 $CM = 0.1$ 은 설정값 중 비용이 상대적으로 높게 설정된 값이다. 백사실계곡 생태·경관보전지역은 핵심구역 설정에 있어 확보하려는 면적 크기와 관계없이 과도한 보호 영역 설정이 아닌 핵심 지역을 중심으로 보전계획을 집중화하여 효율성을 높이고, 자원의 낭비를 최소화하며, 보전과 이용 간의 균형을 맞추는 것이 더 적절하였다. 이는 핵심구역의 파편화를 방지하여 단일화된 핵심 서식지를 구축함으로써, 경계부 관리 비용을 줄이고 불법 훼손이나 외래종 침입을 방어하기 쉬운 관리 편의성 측면이 중요할 것으로 판단하였다.

분석 결과 타당성을 검증하기 위해 시나리오 2의 $CM = 0.1$ 의 핵심구역이 환경생태 지표인 비오톱지수, 계곡과의 거리지수, 생물종지수를 반영하는지 여부를 분석하였다(표 8, 그림 4 참조). 전체 비오톱 I등급지 면적 중 핵심구역에 포함된 면적은 87.1%로 법정보호종과 계곡의 경우 전 면적이 핵심구역에 포함되었으며 산림의 경우, 전체 비오톱 I등급지인 산림 중 73.8%가 핵심구역에 포함되었다. 포함되지 않은 비오톱 I등급지의 경우 계곡과의 거

표 8. 백사실계곡 전체 및 핵심구역 최종안별 비오톱 등급별 면적 및 비율

비오톱 등급	현존식생 유형	백사실계곡 전체		핵심구역 최종안	
		면적(m ²)	비율(%)	면적(m ²)	비율(%)
I 등급	법정보호종 양서류가 출현한 지역	81,913	12.3	81,913	18.3
	다층구조 참나무림	37,826	5.7	33,184	7.4
	다층구조 침엽수림	44,391	6.7	27,520	6.1
	자연 계곡	2,428	0.4	2,428	0.5
	인공 계곡	10	0.0	10	0.0
II 등급	단층구조 참나무림	7,542	1.1	-	-
	단층구조 침엽수림	52,529	7.9	26,362	5.9
	다층구조 자생종 우점 산림	28,322	4.3	18,744	4.2
	습윤지성 자생종이 우점하는 산림	291	0.0	291	0.1
	자생종 다층구조 조성녹지	2,025	0.3	2,025	0.5
III 등급	다층구조 낙엽활엽수림	119,680	18.0	89,238	19.9
	단층구조 낙엽활엽수림	65,663	9.9	50,531	11.3
	단층구조 침엽수림	2,533	0.4	2,533	0.6
	다층구조 외래종 우점 산림	2,083	0.3	2,083	0.5
	단층구조 자생종 우점 산림	19,436	2.9	16,543	3.7
	건조지성 자생종이 우점하는 산림	664	0.1	664	0.1
	관목식생지	1,350	0.2	1,350	0.3
	자생종 단층구조 조성녹지	20,458	3.1	3,600	0.8
IV 등급	산림 나지	4,346	0.7	4,056	0.9
	외래종이 우점하는 산림	502	0.1	502	0.1
	외래종 단층구조 조성녹지	7,503	1.1	3,797	0.8
	밭 경작지	45,341	6.8	25,870	5.8
	과수원	6,073	0.9	47	0.0
	시설경작지	1,487	0.2	1,487	0.3
	묘포장	6,671	1.0	-	-
	소규모 체육시설지	2,059	0.3	484	0.1
V 등급	주거지	37,853	5.7	13,320*	3.0
	상업시설	11,259	1.7	3,654	0.8
	기타 시설지	104	0.0	104	0.0
	도로	15,130	2.3	13,655	3.1
	군사시설	29,565	4.5	18,611*	4.2
	공사현장	7,129	1.1	2,971*	0.7
합계		664,165	100.0	447,577	100.0

* 백사실계곡과 인접한 지역으로 양서류 및 딱따구리류가 지속적으로 관찰되는 곳

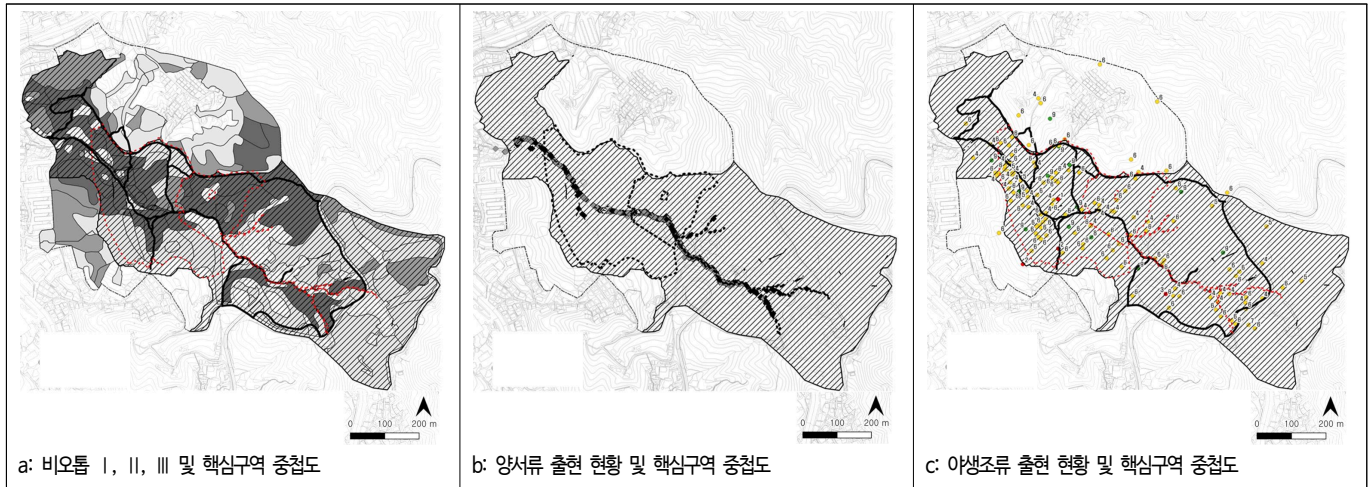
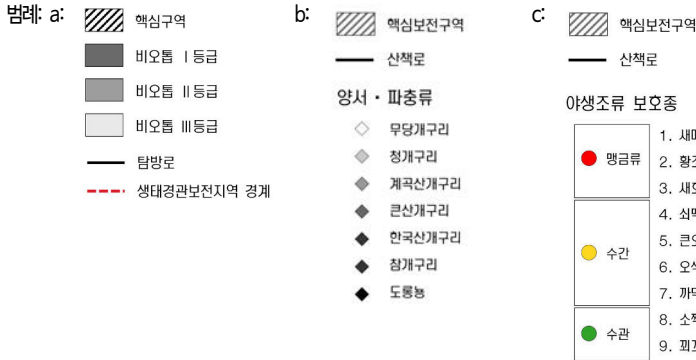


그림 4. 백사실계곡 최종안 중첩도



리가 멀고 생물종 출현이 적어 핵심구역에 포함되지 않은 것으로 판단되었다. 또한 도출된 핵심구역과 매우 인접한 위치에 있어 식생 복원 및 소규모 생물서식공간 조성 등과 같은 관리를 통해 핵심구역으로 확장될 가능성이 있을 것으로 판단되었다. 비오톱 I 등급지와 인접한 비오톱 II, III등급지인 단층구조 자연림, 인공림, 혼효림 등도 핵심구역에 포함되는 등 시나리오 2의 $CM = 0.1$ 이 비오톱지수를 적절하게 반영하였음을 알 수 있다. 일부 비오톱 등급이 낮은 지역이 핵심구역에 포함되어 있는데 이는 비오톱 등급이 높은 지역과 인접하며 계곡과의 거리가 가깝고 연결성을 보여주는 생태계 네트워크를 확보하기 위해 포함된 것으로 판단되었다.

생물종지수 반영 여부를 살펴보면, 양서류가 관찰된 계곡과 일부 산림은 비오톱 등급이 I 등급으로 핵심구역에 전 지역이 포함되었다. 계곡과의 거리가 멀어질수록 야생조류 출현현황의 영향을 많이 받았는데 별서터 주변 인공림과 능금마을(시가화지역), 군사시설 주변 산림이 그 영향을 많이 받아 핵심구역에 포함되었다. 일부 야생조류가 관찰된 시가화지역인 평창동 주변이나 계곡과의 거리가 멀고 비오톱 등급이 낮은 산림지역을 제외하고 대부분의 야생조류 출현지역이 핵심구역에 포함되었다. 이를 바탕으로 시나리오 2의 $CM = 0.1$ 은 생물종지수가 적절하게 반영되어 핵심구역이 도출되었음을 알 수 있었다.

백사실계곡 생태·경관보전지역의 핵심구역은 명승 백석동천과 별서터 일대를 중심으로 설정되어 있어 역사·문화자원의 보호 기능은 비교적 명확하나 도롱뇽과 무당개구리 등 양서류 출현지와 자연성이 높은 산림 일부는 기존 핵심구역 외곽 또는 완충구역 주변에 걸쳐 분포하였다. 특히 능금마을 북측 산림과 현통사 주변부는 양서류 서식 및 이동 가능성과 비오톱 등급을 함께 고려할 때 보호·복원 관리가 필요한 공간으로 판단되었다. 따라서 기존 보호구역 범위는 역사문화자원 중심의 핵심구역 설정에는 적합하지만, 생물종의 실제 출현지와 수계·산림 연결성을 충분히 반영하기에는 한계가 있었다. 또한 계곡과 인접한 탐방 동선이 여러 갈래로 형성되어 있어, 이용 집중 구간에서는 산란지 교란, 토양 압압, 식생 훼손 가능성을 낮추기 위한 동선 변경과 안내·출입관리 방안이 필요하였다.

3.3.4 관리계획

백사실계곡 생태·경관보전지역의 적정 보전 및 이용하기 위해서는 비오톱, 생물종 등을 반영하여 핵심구역, 완충구역, 협력구역으로 나누어 생태계 현황에 따른 보호지역 재설정 필요하였다. 이를 통해 생태계 교란을 최소화

하며 생물다양성 증진 및 보전이 가능하는 등 대상지를 취지에 맞게 보전될 수 있을 것이다(그림 5 참조).

핵심보전구역 내 행위 제한을 위해서는 핵심구역 내부 및 생물 주요 서식공간 주변 산책로 등을 차단하여 폐쇄하거나 우회로를 조성하는 방안이 필요하였다. 최종안의 핵심보전구역 외부에 설치된 기존 산책로는 유지하고 내부에 설치된 산책로의 경우, 생태적 가치가 낮은 곳으로 산책로를 우회시켜 생물 주요 서식공간에 접근을 제한하였다. 또한 핵심보전구역 내부 산책로의 경우, 간섭을 최소화하도록 최단길이로 계획하였으며 이용 시 산책이나 생태교육, 역사·문화교육이 아닌 기타 행위는 모두 제한하고 반려견 산책 역시 제한한다면 핵심보전구역 내 교란을 최소화할 수 있을 것으로 기대되었다.

백사실계곡 생태·경관보전지역의 경우, 보호지역 중앙에 역사문화지와 명승으로 지정된 지역이 위치하여 항상 출입을 폐쇄하는 것은 현실적으로 어려운 실정이었다. 따라서 역사·문화시설지 중 생물 주요 서식공간으로 활용되거나 매우 인접한 장소에 한해서 출입은 제한하고자 하였다. 생물이 활동하는 주요 시기인 번식기와 산란기에 이용자의 출입과 같은 행위의 제한한다면 백사실계곡 생태·경관보전지역 내 생물다양성 증진 및 보전이 일정 수준 가능하다고 판단되었다.

Marxan with zones 프로그램을 이용하여 분석된 핵심보전구역을 실질적으로 확보하기 위해 식생 복원 지역, 매수 필요 지역을 별도로 도출하여 관리계획 설정이 필요하였다. 매수 필요 지역은 계곡과의 인접성, 법정보호종 양

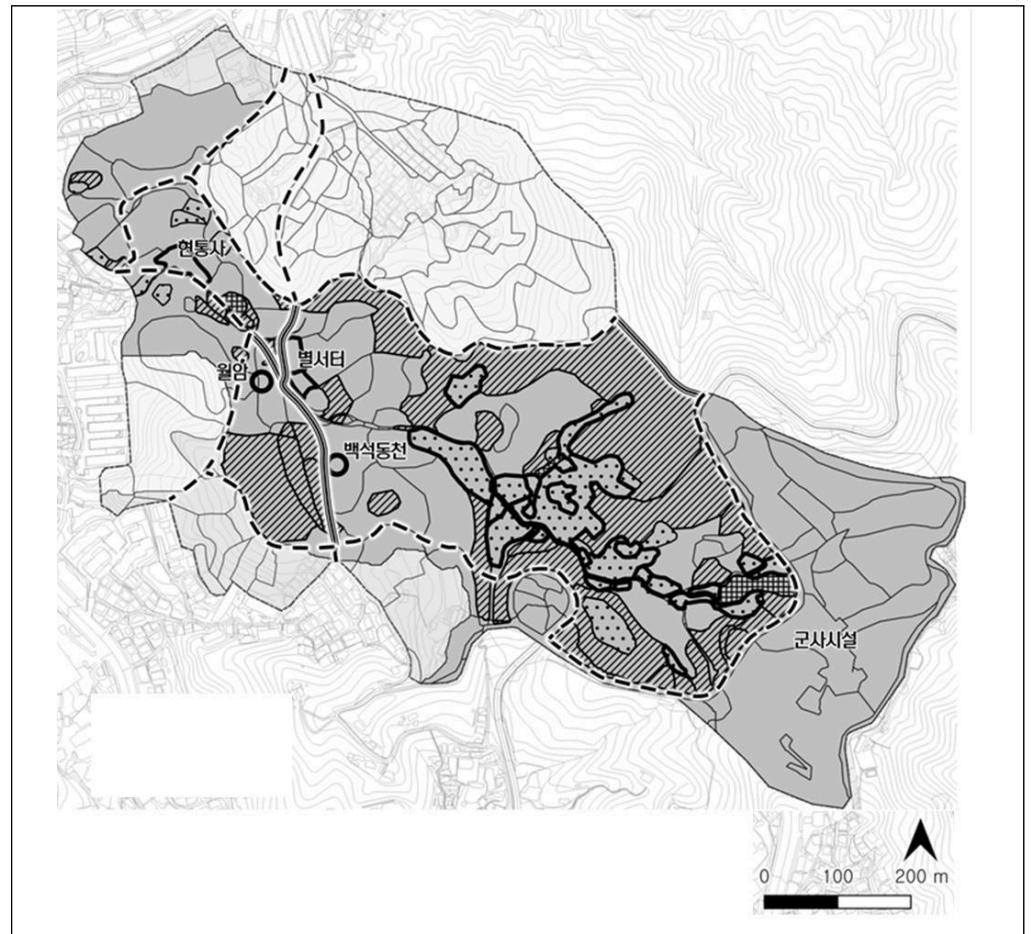


그림 5. 백사실계곡 생태·경관보전지역 관리계획도

범례	핵심구역	식생 복원 필요 지역
	완충구역	우선 매입 필요 지역
	협력구역	매입 필요 지역
		역사·문화자원
		통행 제한 산책로
		산책로

서류 서식 여부, 생물종 출현 정도, 주변 현존식생 비오톱 등급 등 생태적 가치를 기준으로 우선 매입 필요 지역과 매입 필요 지역으로 구분하였다. 이를 통해 전체 매입이 어려운 경우, 생태적 가치가 높거나 생태계에 직접적인 영향이 큰 지역을 우선 매입하고 매입하지 못한 시가지 지역의 경우 친환경농법을 계도하거나 일부 행위 제한을 통해 생태계 영향을 최소화할 수 있을 것으로 기대되었다. 식생 복원 지역은 시나리오 최종안의 핵심보전구역 내 인공림, 관목식생지, 벌채 및 훼손지인 산림과 조경수식재지로 조성되어 있는 조성녹지가 해당되었다. 해당 지역은 생태 전문가의 자문을 통해 주변 자연림을 모델 삼아 복원 계획을 수립 및 시행한다면 자연성을 높일 수 있을 것으로 기대되었다.

완충구역 및 협력구역 관리로 인접생물권 연계를 선정하였다. 핵심보전구역 연계를 위해 생물이 이동하는 공간에 거점녹지를 조성하는 등 생물서식범위 확대를 유도할 필요가 있었다. 따라서 완충구역과 협력구역 내 거점녹지를 조성하고 이를 핵심구역 간의 생물서식지 연결을 통해 다양한 생물이 접근하여 생물다양성 증진에 큰 도움이 될 것으로 기대되었다.

협력구역 내에 안내판 및 안내센터를 설치하여 홍보 및 교육과 관리 진행 및 이를 통한 시민참여 유도 등이 필요하였다. 현재 백사실계곡 생태·경관보전지역에는 도롱뇽, 무당개구리, 오색딱다구리 등 다양한 보호종이 서식함에도 불구하고 이에 대한 인식과 관심이 부족하였다. 따라서 보전지역 안내판 및 안내센터를 조성, 생물종 관찰 프로그램을 운영하여 시민들의 교육을 실시한다면 지역주민의 참여 및 환경에 대한 인식변화를 가질 수 있으므로 관리방안 수립이 필요하였다.

4. 결론

본 연구는 백사실계곡 생태·경관보전지역을 대상으로 환경생태적 특성과 사회·문화적 특성을 반영한 공간 관리 모형 및 관리방안을 제시하였고, 도시 보호지역의 관리구역을 정량적으로 설정하는 절차를 제시하였다. 백사실계곡은 양서류 산란지와 양호한 식생, 역사·문화자원, 탐방 이용이 중첩되는 복합적 공간이므로, 구역 내에서 일률적으로 관리하기보다 생태적 핵심공간과 이용·협력 관리공간을 구분하는 접근이 필요하였다.

구역 설정을 위한 분석 전에 현존식생, 계곡과의 거리, 생물종 출현, 이용 강도를 계획단위별 비용지표로 구성하고, 생물종 출현지와 역사·문화자원을 보전특성으로 반영하였다. Marxan with zones 분석에서는 핵심구역 목표 비율을 70%, 50%, 30%로 달리한 세 가지 시나리오를 비교하였다. 그 결과 핵심구역 목표를 50% 이상으로 설정한 시나리오 2가 생태적 중요지역의 포함도와 관리 실행 가능성의 균형 측면에서 가장 적절하였다. 최종안으로 선택한 CM = 0.1 대안은 백사실계곡 수계, 법정보호종 출현지, 비오톱 I 등급지를 중심으로 연속적인 핵심구역을 형성하였으며, 주변부에는 완충 및 협력 관리가 필요한 공간을 도출하였다.

본 연구에서는 보전지역 설정기준을 바탕으로 보전지역에 대한 중요도에 따라 보호지역 설정 및 구역별 공간에 적절한 관리방안을 제시하였다. 핵심구역에서는 산란지와 자연성이 높은 산림을 우선 보호하고, 불필요한 샛길 폐쇄, 탐방로 우회, 훼손지 복원, 민감 서식처의 출입 조절을 강화할 필요가 있었다. 완충구역에서는 핵심구역과 주변 시가지지역 사이의 교란을 완화하기 위해 식생 복원과 이용 동선 정비를 병행할 필요가 있었다. 협력구역에서는 사유지, 경작지, 마을 및 탐방 이용과 관련된 이해관계 조정이 중요하므로, 토지매입 우선순위 설정, 주민 협력형 관리, 생태해설 및 안내체계 개선을 추진할 필요가 있었다.

본 연구는 대규모 자연보호지역 또는 하천 유역에서 주로 적용된 Marxan with zones를 도시 내부의 소규모 보호지역에 적용했다는 점에서 의의가 있다. 그리고 핵심보전구역은 엄격히 보호되되, 생태적 민감도가 상대적으로 낮고 이용 압력이 높은 구역인 완충구역과 협력구역에서는 제한적인 복원사업이나 시민 이용을 허용하는 공간적 타협안을 시각적으로 제시할 수 있다. 또한 서울시의 법정 관리계획 수립 시 핵심보전구역과 완충구역을 과학적으로 구획하고, 제한된 예산을 효율적으로 배분하는 근거자료로 활용될 수 있다.

연구한계로 Marxan with zones 프로그램의 시나리오별 최적인 선정 시 정성적 판단보다는 목표달성률, 선택빈도, 공간적 응집도, 반복 횟수 수렴 기준 등 정량적 임계값을 가지고 정확히 산출할 필요가 있다. 또한 사용된 생물종 출현 데이터와 이용강도 지표는 특정 시점의 조사결과에 기반하고 있기 때문에 기후 변화, 계절적 이동, 장기적인 개체군 변동성 등을 완벽히 반영하지 못하는 내재적 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구 결과는 현재 시점의 생태적 가치와 이용 압력을 반영한 결과로 해석해야 하며, 장기 모니터링 데이터가 축적됨에 따라 지속해서 갱신될 수 있다. 향후 연구에서는 양서류 서식 변화, 탐방객 이용 행태 및 주말과 야간, 계절적 변동성, 상류부 능금마을 일대 생태적 복원 노력 등을 반영하여 적정 관리방안을 제시할 필요가 있다.

References

1. 강성룡, 장인영, 한상학, 박은진, 유재영, 강호정(2023) 한국 제주도 및 고창 생물권보전지역 생물다양성 지표 평가. 환경정책 31(4): 201-229.
2. 김근한, 정휘철, 윤정호, 김오석, 전성우(2017) 공간분석을 이용한 국립공원 신규 후보지역 선정 평가. 한국지형 공간정보학회지 25(3): 63-74.
3. 모용원, 이동근, 김호걸, 백경혜, 남상준(2013) 강원도 평창지역의 보호지역 확대를 위한 공간의사결정 지원방안. 한국환경복원기술학회지 16(1): 171-180.
4. 박수영, 한봉호, 박석철(2024) Marxan을 이용한 도시 논습지의 적정 생물서식공간 선정 연구: 부천시 대장동지구를 대상으로. 한국조경학회지 52(6): 43-57.
5. 서울시(2012) 백사실계곡 생태·경관보전지역 관리계획 수립 연구(2차년도). 서울특별시.
6. 서울시(2019) 백사실계곡 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구. 서울특별시.
7. 서울시(2025) 백사실계곡 생태·경관보전지역 정밀변화관찰 연구. 서울특별시.
8. 염정현(2015) 한국 국립공원의 자연보존지구 설정 모형 개발 연구: 생태지도를 반영한 Marxan with Zones 적용. 서울시립대학교 대학원 박사학위논문.
9. 윤호근, 한봉호, 곽정인(2020) Marxan을 이용한 도시하천의 보전지역 설정 및 생태적 관리방안 연구: 서울시 중랑천을 중심으로. 한국조경학회지 48(5): 16-27.
10. 이시영, 윤희재, 김대수, 김양근, 최재혁(2024) 산림경관 평가를 위한 경관지표 및 요소들 간의 가중치 설정에 관한 연구. 한국조경학회지 52(6): 14-27.
11. Ardron, J.(2008) Marxan Good Practices Handbook. The University of Queensland.
12. Ardron, J. A., H. P. Possingham and C. J. Klein(2010) Marxan Good Practices Handbook. Version 2. Pacific Marine Analysis and Research Association.
13. Davis, F. W. and D. M. Stoms(1996) Sierran vegetation: A gap analysis. In Sierra Nevada Ecosystem Project: Final Report to Congress. Vol. 2. 1. University of California, Centers for Water and Wildland Resources pp. 671-690.
14. Klein, C., A. Chan, L. Kircher, A. Cundiff, Y. Hrovat, N. Gardner, A. Schloz, B. Kendall and S. Airame(2008) Striking a balance between biodiversity conservation and socioeconomic viability in the design of marine protected areas. Conservation Biology 22(3): 691-700.
15. Niemi, G. J. and M. E. McDonald(2004) Application of ecological indicators. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 35(1): 89-111.
16. Watts, M., B. Ian, S. Romola, K. Carissa, W. Kerrie, S. Charles, L. Reinaldo, K. Lindsay and P. Hugh(2009) Marxan with zones: Software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. Environmental Modelling & Software 24: 1513-1521.
17. Worton, B. J.(1989) Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. Ecology 70(1): 164-168.