

ORIGINAL ARTICLE

GIS를 활용한 생태민감성 분석 및 평가 연구 -경주시 대상으로-

왕정 · 허상현^{1)*}

동국대학교 WISE캠퍼스 대학원 조경학과, ¹⁾동국대학교 WISE캠퍼스 조경·정원디자인학부

Ecological Sensitivity Analysis and Evaluation Using GIS: A Case Study of Gyeongju City

Zheng Wang, Sang-Hyun Heo^{1)*}

Department of Landscape Architecture, WISE Campus, Dongguk University, Gyeongju 38066, Korea

¹⁾*Department of Landscape Architecture and Garden Design, WISE Campus, Dongguk University, Gyeongju 38066, Korea*

Abstract

Ecological sensitivity, which refers to the degree of ecosystem response to external disturbances, serves as a critical framework for regional environmental protection and sustainable development. This study focused on Gyeongju, South Korea, a historical city with rich natural and cultural resources, that has faced increasing ecological pressures owing to rapid urbanization in recent years. By integrating the geographic information system (GIS), remote sensing technologies, and analytic hierarchy process (AHP), this study developed an ecological sensitivity evaluation framework based on six ecological factors: slope, aspect, elevation, water buffer zones, vegetation coverage index, and land use types. The weights of these factors were determined using the AHP method, and a composite ecological sensitivity map was generated through GIS overlay analysis. Furthermore, the spatial clustering characteristics of ecological sensitivity were explored using global Moran's I and local hotspot analysis. The results indicate that Gyeongju exhibits high overall ecological sensitivity with notable spatial heterogeneity. High-sensitivity areas are primarily distributed in the mountainous regions on the eastern and western sides, as well as in the southern highlands, characterized by high vegetation coverage and steep slopes. Low-sensitivity areas are concentrated in urban centers and plains. Among the factors, vegetation coverage index (0.4576) was identified as the most influential, followed by land use types (0.1992) and water buffer zones (0.1295). The global Moran's I index of 0.930 revealed a strong positive spatial autocorrelation, with hotspots concentrated in the eastern and western regions and parts of the northern and southern areas and coldspots predominantly located in urban and plain regions. This study enhances the scientific robustness and applicability of ecological sensitivity assessments by combining GIS and AHP with spatial autocorrelation analysis, providing scientific foundational data for environmental protection and land-use planning in Gyeongju.

Key words : Ecological sensitivity, Analysis hierarchy process, Spatial autocorrelation, ArcGIS

1. 서론

자연 생태환경은 복잡하고 개방적인 시스템으로, 인

간 사회에 필요한 자원을 제공하며 모든 사물의 생존을 위한 토대가 되었다. 그러나 자연환경은 고정된 것이 아니라, 자신과 외부의 소스가 끊임없이 변화함에 따라 스

Received 20 November, 2024; Revised 8 January, 2025;

Accepted 8 January, 2025

*Corresponding author : Sang-Hyun Heo, Dept. of Landscape Architecture and Garden Design, WISE Campus, Dongguk University, Gyeongju 38066, Korea

Phone : +82-54-770-2234

E-mail : hsh@dongguk.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스로도 변한다. 지구 온난화, 엘니뇨, 라니냐, 홍수, 가뭄, 사막화 등 자연재해와 환경 문제는 생태계의 안정성과 인간 사회 발전에 부정적 영향을 미친다. 이러한 환경 악화의 원인은 기후 변화뿐만 아니라, 도시화와 자원 남용 등 인간 활동에서 비롯된 것이기도 하다.

사회 발전에 따라 자원 수요와 토지 이용이 증가하면서, 식생 피복률 감소, 생물 다양성 저하, 서식지 상실, 수질 오염 등 다양한 환경 문제가 점차 심화되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 생태 민감성 연구는 점차 중요한 연구 분야로 자리 잡고 있다. 생태 민감성은 생태계가 자연적 요인 및 인간 활동에 얼마나 민감하게 반응하는지를 나타내며, 이는 지역 생태계가 외부 간섭을 받을 때 환경 문제가 발생할 가능성을 반영한다(Ouyang et al., 2000).

최근 GIS 기술과 위성 영상을 결합한 연구는 생태 민감성 평가의 정확성과 활용성을 크게 향상시켰다(Wan et al., 2016; Zheng et al., 2019; Chen et al., 2024; Qin et al., 2024). 이러한 기술은 다양한 요인이 환경에 미치는 영향을 분석함으로써 지역의 환경 상태를 효과적으로 평가할 수 있게 하며(Liu et al., 2015; He et al., 2018), 환경 복원 및 생태 보호 계획 수립에 과학적 근거를 제공한다. 기존 연구에 따르면, 생태 민감성 연구는 특정 지역의 생태 문제를 해결하고 맞춤형 해결책을 수립하는 데 중요한 역할을 한다(Wei et al., 2020; Pathak et al., 2021; Hamad and Surucu, 2024; Al Waeli et al., 2024). 이러한 연구 방법들은 지역 생태 문제 분석과 대응을 위한 기술적 지원을 제공할 뿐만 아니라, 다양한 지역의 지속 가능한 발전 계획 수립에 과학적 기반을 마련한다.

현재 생태 민감성 관련하는 연구에서 사용되는 대표적인 분석 방법으로는 주성분 분석(PCA)(Akbar et al., 2022), 계층분석법(AHP)(Hu et al., 2021), 델파이 기법(Delphi)(Tran et al., 2020)이 있다. 이 중 주성분 분석은 변수에 대한 높은 요구 사항과 완전한 객관성으로 인해 의사결정자의 의견을 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 델파이 기법은 전문가의 의견에 주로 의존하며, 정밀한 수학적 모델의 지원이 부족하다는 단점이 있다. 반면, 계층분석법은 구조가 단순하고 복잡한 의사결정 문제를 효과적으로 처리할 수 있으며, 전문가가 요인의 중요도를 평가할 수 있도록 허용하여 객관성과 주관성을 조화롭게 결합한다는 점에서 의사결정자가 이해하고 활용하기에 용이하다.

생태 민감성 연구는 전 세계적으로 다양한 지역에서 널리 적용되고 있으나, 지역적 특성과 생태 문제의 다양성으로 인해 특정 지역에 특화된 연구가 필요하다. 경주시는 신라 시대의 고도로서 풍부한 역사문화유산을 보유하고 있으며, 국가공원과 다양한 자연 보호구역이 분포하여 역사적, 문화적 가치는 물론 중요한 생태적 의미를 지니고 있다. 이는 경주시를 지역 생태 민감성 분포 특성을 연구하기에 이상적인 대상으로 만든다. 특히, 최근 경주시의 현대화 발전 속도가 가속화되면서 생태 보호에 대한 높은 요구가 제기되고 있다. 그러나 기존 연구는 특정 지역 또는 특정 생태 문제에 집중되어 있으며(Oh et al., 2011; Shin et al., 2024), 경주시 생태 상황에 대한 전체적이고 체계적인 평가가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 경주시를 대상으로 GIS 기술과 계층분석법(AHP)을 결합하여 생태 민감성 평가를 위한 유연성이 높은 체계를 구축하고, 공간 자기상관 분석을 통해 생태 민감성의 공간 분포 및 밀집 특성을 탐구하고자 한다. 본 연구는 경주시의 환경 보호 및 도시 계획에 필요한 과학적 근거와 기초 자료를 제공에 그 목적이 있다.

2. 자료 및 방법

본 연구는 기존 문헌을 참고하여 평가 인자를 선정하고, AHP 분석법을 통해 인자별 가중치를 산정하였다. 이후 GIS를 활용하여 연구 지역의 생태 민감성을 평가하고 지도화하였다. 단일 인자 민감성, 종합 민감성, 공간 자기상관 분석을 통해 민감성의 공간적 분포를 다각적으로 파악하고, 생태 복원과 도시 계획을 위한 합리

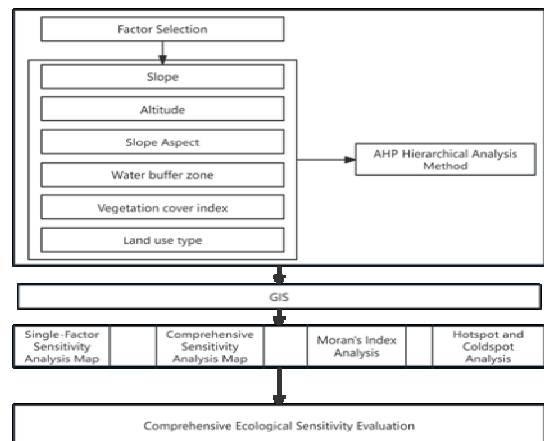


Fig. 1. Research workflow diagram.

적인 제안을 제시하였다. 이하 연구 프레임워크를 나타낸다(Fig. 1).

2.1. 연구 대상지

경주시는 경상북도 동남단에 위치하며, 동경 128°58′ ~ 129°31′, 북위 35°39′ ~ 36°04′에 자리한다. 면적은 1,323.85 km², 동쪽은 동해와 접하며, 남서쪽은 청도군, 북서쪽은 영천시, 북쪽은 포항시, 남쪽은 울산광역시와 맞닿아 있다(Fig. 2). 경주시 연평균 기온은 12.5℃, 강수량은 1,157 mm이다. 여름철에는 연평균 3, 4회의 태풍이 발생하며, 평균 상대 습도는 62.2%, 평균 풍속은 7.9 m/s를 기록한다.

2.2. 데이터 출처 및 처리방법

2.2.1. 데이터 출처

본 연구에서는 미국 지질 조사국(USGS)이 2022년 5월 촬영한 Landsat8 원격 감지 영상을 활용하였으며, 클라우드 커버리지 10% 이하의 영상을 선택하였다. 또한, ESRI의 2022년 Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover 데이터 세트(해상도 10 m × 10 m), 국토지리정보원의 경주시 행정경계 자료, 일본 우주항공연구개발 기구(JAXA)의 30 m DEM 데이터를 사용하였다.

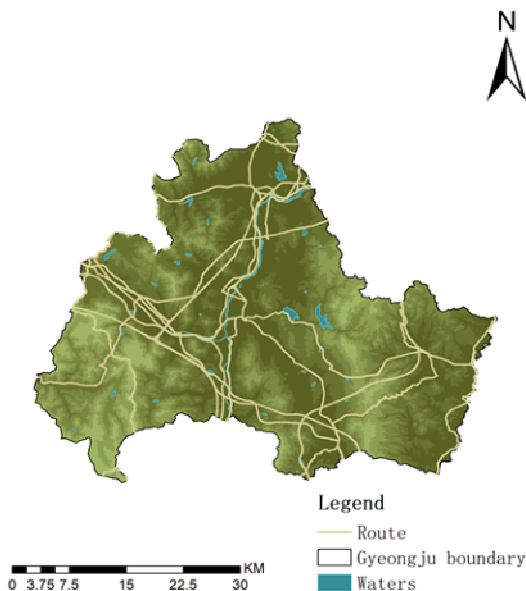


Fig. 2. Study object location map.

데이터 간 해상도와 좌표 체계의 차이를 줄이기 위해 1 m × 1 m 재샘플링하고, Korea_2000_Korea_Unified_Coordinate_System 좌표계로 통일하였다.

2.2.2. 데이터 처리

연구의 편의를 위해 경주시 내 지역의 행정 구역을 시내 동 지역으로 통일하여 구분하였다. 4개의 DEM 데이터를 하나의 래스터 이미지로 모자이크 처리하였으며, 본 연구에서 사용한 경사도, 고도, 경사 방향, 수역 완충 지대는 모두 이 DEM 데이터를 기반으로 분석되었다.

위성 영상은 ENVI 5.6을 사용해 대기 보정과 방사정량화를 수행하였다. 정규화차이식생지수(NDVI)는 Deering(1978)의 방식을 따르며, (-1, 1) 범위로 설정하였다(Guo, 2003).

ESRI의 토지 이용 유형 데이터를 경주시 행정 경계 데이터와 연계한 결과, 건조지역, 산림지역, 습지(수변 식생), 농업지역, 수역, 나지, 초지의 7가지 유형이 확인되었다. 본 연구에서는 오차를 최소화하기 위해 나지와 건축용지를 하나로, 수생 식물과 산림용지를 하나로 통합하여 분석하였다.

2.3. 분석방법

2.3.1. 평가인자 선정 및 등급 구분

선행 연구에서 사용된 평가 인자와 경주시의 생태 환경 조건을 종합적으로 고려하여, 본 연구는 경주 지역에 적합한 평가 인자를 선정하였다. Table 1은 주요 선행 연구에서 사용된 연구 지역과 평가 인자를 정리한 것이다.

우선, 경주시와 선행 연구 지역의 지리적·생태적 유사성을 살펴보면, 경주는 북반구에 위치하며, 지형이 복잡하고 고도 차이가 크며, 산지 지역에 속한다. 이는 선행 연구에서 다룬 민강 유역(Li et al., 2006), 티베트 고원(Wang et al., 2008), 중국 판다 국가공원(Xu et al., 2023)과 유사한 지리적 특성을 가진다. 이들 연구는 해발, 경사도, 향이 생태 민감성에 중요한 영향을 미친다는 점을 확인하였다. 또한, 경주시의 토양 유실 관련 연구(Oh et al., 2011)에서도 지형 요인이 수토 유실 속도에 영향을 미친다는 점이 입증되었다. 이러한 결과는 지형 인자가 경주의 생태 민감성 평가 체계에 적합함을 보여준다.

Table 1. Evaluation factors and study areas from previous research on ecological sensitivity

Previous study	Study area	Evaluation factors	Selected factors
Li et al., 2006	Minjiang River, China	elevation, slope, accumulated temperature, drought index, land use, vegetation, soil, water-soil erosion, and population density.	elevation, slope, land use
Wang et al., 2008	Tibetan Plateau	altitude, slope, rainfall, wind, accumulated temperature, soil type, vegetation cover, soil erosion, vegetation degradation, mountain hazards, desertification, road density, pasturage disturbance, cultivation disturbance, population density	altitude, slope, vegetation cover
Oh et al., 2011	Gyeongju	rainfall erosion factor, soil erosion factor, altitude, slope, land cover	altitude, slope
Tsou et al., 2017	Hangzhou	elevation, slope, land use type, distance to residential areas, distance to main roads, population density, distance to ecological sensitive areas	land use type, distance to ecological sensitive areas
Yilmaz et al., 2020	Denizli province	elevation, slope, aspect, proximity to water surface, land cover, vegetation coverage	landcover, vegetation coverage
Xu et al., 2023	Giant Panda National Park	elevation, slope, aspect, terrain relief, temperature, precipitation, vegetation coverage, vegetation type, density, buffer distance, land use	elevation, slope, aspect, density, buffer

둘째, 판다 공원과 항저우 지역(Tsou et al., 2017) 연구에서는 수역 완충지대를 평가 인자로 채택하였다. 이는 수역이 지역 생태 민감성에 영향을 미친다는 것을 증명하는 사례이다. 경주시의 경우 남북으로 흐르는 형산강이 전역을 관통하고 있으며, 수역 완충지대는 지역 생태계 보호에 중요한 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 수역 완충지대를 평가 인자로 선정하였다.

셋째, 경주에는 다양한 토지 이용 유형이 존재하며, 여기에는 산림, 초지, 도시용지가 포함된다. 이는 선행 연구에서 다룬 항저우(Tsou et al., 2017)와 Denizli 지역(Yilmaz et al., 2020)과 유사하다. 이러한 배경에서 토지 이용 유형은 인간 활동이 생태계에 미치는 영향을 반영하는 중요한 평가 인자로 선정되었다.

마지막으로, 경주는 광범위한 산림 면적과 국립공원을 포함하고 있으며, 생물 다양성이 풍부하다. 이는 식생피복지수(NDVI)가 생태 민감성 평가에서 중요한 요소가 되는 이유이다. 선행 연구들은 식생피복률이 높은 지역이 토양 유실 방지, 기후 조절 등 다양한 생태적 기능을 수행하며, 민감성이 높다는 점을 보여준다(Oh et al., 2011; Wan et al., 2016; Xu et al., 2023). 이에 따라 본 연구는 식생피복지수를 평가 인자로 채택하였다.

따라서 선행 연구와 경주의 지형 및 생태 환경 특성을 종합적으로 검토한 결과, 본 연구는 고도, 경사도,

향, 수역 완충지대, 식생피복지수(NDVI), 토지 이용 유형을 생태 민감성 평가의 주요 인자로 선정하였다. 다음으로, 선정된 평가 인자와 생태 민감성 간의 상호 관계를 구체적으로 분석하고, 이를 바탕으로 민감성 등급 분류에 대해 논의하고자 한다(Table 2).

고도, 경사도, 향은 지형적 요인으로, 동식물 군집의 수직 분포, 토양 유실, 지질 재해 등에 중요한 영향을 미친다. 선행 연구에 따르면, 고도가 높고 경사가 급할수록 생태 민감성이 증가하는 경향이 있다(Wang et al., 2008). 연구 지역은 산지가 많고 고도의 변화가 크며 북반구에 위치하여 남향 경사면이 북향 경사면보다 태양광을 더 오래 받는다. 이러한 특성 때문에 남향 경사면의 민감성은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다(Tsou et al., 2017; Zheng et al., 2019; Xu et al., 2023).

수역 완충지대는 홍수 조절, 수자원 보존, 미기후 조절 등 다양한 생태적 기능을 수행하며, 야생 동물에게 서식지를 제공한다(Oh et al., 2011). 수역에서 멀어질수록 잠재적 피해가 감소하여 민감성이 낮아지는 경향이 있다(Nguyen et al., 2016). 이에 본 연구는 동일한 개념을 적용하여 수역 완충지대의 거리를 설정하였다.

식생은 토양 및 수자원 보존 및 종 다양성 증대 등 여러 생태적 기능에서 필수적인 역할을 하며, 생태계에 큰 영향을 미친다(Wan et al., 2016; Chen et al., 2024). 식생피복지수는 주로 식생 건강 상태 평가와

Table 2. Criteria for classification of ecological sensitivity evaluation factors

Ecological factors	Level type				
	Very low sensitivity	Low sensitivity	Moderate sensitivity	High sensitivity	Very high sensitivity
Slope/ (°)	0~5	5~15	15~35	35~55	> 55
Altitude/ (m)	<150	150 - 300	300 - 500	500 - 600	> 600
Aspect	Plain / Due south	Southeast / Southwest	Due east / Due west	Northeast / Northwest	Due north
Water buffer zone/ (m)	> 150	100-150	50-100	20-50	< 20
Vegetation cover index	0.1	0.1-0.3	0.3-0.6	0.6-0.8	0.8-1
Land use type	Construction land	Agricultural land	Grassland	Waters	Woodland

농작물 모니터링에 사용되며(Ryu et al., 2024), 정규화된 값은 -1에서 1 사이의 구간을 가진다. 여기서 -1은 식생이 없는 지역을, 1은 식생이 울창한 지역을 나타낸다(Choi et al., 2020). 따라서 값이 클수록 식생피복률이 높아지며, 민감성 또한 높아진다(Nguyen et al., 2016; Xu et al., 2023).

마지막으로, 인간 활동은 자연 생태계에 극심한 영향을 미치며(Chen et al., 2024), 토지 이용 유형은 인간 활동의 흔적과 지역 특성을 반영한다. 이는 인간 활동에 의해 후천적으로 형성된 토지 속성으로, 서로 다른 토지 속성 간 민감성 정도의 차이가 크다. 예를 들어, 산림과 초지는 도시용지보다 민감성이 높다(Tsou et al., 2017; Zheng et al., 2019).

종합적으로 평가 인자의 민감성 등급은 5단계로 구분되었다. 자연 구분법(Jenks)은 데이터의 분포 특성과 통계적 지표를 바탕으로 결과를 다섯 개의 민감성 등급으로 나누는 방식이다. 이 방법에 따르면 값이 클수록 민감성이 높고, 값이 낮을수록 민감성이 낮음을 의미한다(Li et al., 2024)(Table 2).

2.3.2. 생태인자 가중치 결정

본 연구에서는 계층분석법(AHP)을 사용하여 생태인자의 가중치를 결정하였으며, 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 전문가 평가법을 활용하여 판단행렬을 채점하였다. 계층분석법은 1970년대 (Saaty, 1977)에 의해 제안된 다단계 가중치 결정 방법이다. 구체적인 계산 절차는 다음과 같다.

1. 의사결정 문제를 생태 민감성을 목표 계층으로 설정하고, 영향을 미치는 각 인자를 두 번째 계층으로 분

해하였다.

2. 요인의 중요도는 17단계로 나눌 수 있으며, 각각 1/9부터 9까지로 표시된다. 가장 중요한 요인은 9, 가장 덜 중요한 요인은 1/9에 해당한다(Saaty, 1990).
3. 판단행렬을 작성하여 i 행과 j 열의 관계를 비교하고, 대각선 값은 1로 설정하였다. i 행이 j 열보다 중요할 경우, (i,j) 는 1보다 크고 (j,i) 는 그 역수가 된다(Saaty, 1990).
4. 전문가 평가를 통해 판단행렬을 완성하고, 최대 고유값(λ_{max})을 계산하여 각 인자의 가중치를 도출하였다. 공식은 다음과 같다(Saaty and Vargas, 2001).

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(A \cdot \omega)_i}{\omega_i} \right)}{n} \quad \text{수식 1}$$

공식에서 A 는 판단행렬, ω 는 가중치 벡터, n 은 행렬의 차수를 나타낸다. $(A \cdot \omega)_i$ 는 행렬 A 와 가중치 ω 벡터의 곱에서 i 번째 항을 의미하며, ω_i 는 가중치 벡터의 i 번째 항을 나타낸다.

5. 일관성 검정을 수행하였으며, $CR < 0.1$ 경우는, 작성된 판단행렬이 유효한 것으로 간주된다. 공식은 다음과 같다(Saaty and Vargas, 2001).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{수식 2} \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{수식 3}$$

여기서 CI 는 일관성 지수(Consistency index)를

Table 3. RI of low order judgment matrix

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

나타내며, n 은 판단행렬의 차수로, 본 연구에서는 $n=6$ 이다. CR는 일관성 비율(Consistency ratio)을 의미하며, RI는 랜덤 일관성 지수(Random index)로, RI 값은 Table 3과 같다(Saaty, 2004).

2.3.3. 공간 중첩 분석

처리된 생태 인자에 가중치를 부여후에, ArcGIS에서 중첩 분석을 수행하여 최종적으로 경주시 생태 민감성 분석도를 도출하였다. 이 공식은 다음과 같다.

$$P_i = \sum_{i=1}^n W_i \times K_i, n = 1, 2, \dots, 6 \quad \text{수식 4}$$

위의 공식에서 P_i 는 i 번째 생태인자의 민감성 지수, n 은 총 평가 수, W_i 는 i 번째 생태인자의 가중치, K_i 는 i 번째 생태인자의 생태민감성 값이다.

2.3.4. 공간 자기상관 분석

공간 자기상관 분석은 특정 속성이 공간적 위치에서 관측값 간 상관관계를 평가하는 공간 통계 기법이다 (An et al., 2023). 공간 자기상관은 양의 상관관계와 음의 상관관계로 구분된다. 양의 상관관계는 공간 거리가 가까울수록 관측값이 유사하게 집적되는 현상을, 음의 상관관계는 공간 거리가 가까울수록 관측값이 분산되는 현상을 의미한다(Xue et al., 2019). 공간 자기상관은 분석 범위에 따라 전역 자기상관(Global spatial autocorrelation)과 지역 자기상관(Local spatial autocorrelation)으로 구분된다. 전역 자기상관은 특정 지역 내 속성의 공간 분포가 인접 지역과 얼마나 연관되어 있는지를 나타내며, 주로 변수의 공간적 자기상관성과 분포의 이질성을 분석하는 데 활용된다(Han et al., 2023).

대표적인 지표로는 전역 Moran's I 지수가 사용되며, Moran's I 값의 범위는 $[-1, 1]$ 이다. $I > 0$ 인 경우는 양의 공간 상관관계로, 유사한 속성을 가진 공간 단위가 군집 상태를 보임을 의미한다. $I < 0$ 인 경우는 음의 공간

상관관계로, 다른 속성을 가진 공간 단위가 군집 상태를 보임을 나타낸다. $I = 0$ 인 경우는 공간 상관관계가 없음을 의미하며, 분포가 완전히 무작위임을 나타낸다. 공식은 다음과 같다.

$$Global\ Moran's\ I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)} \quad \text{수식 5}$$

공식에서 n 은 공간 격자 단위의 수를 나타내며, x_i 와 x_j 는 각각 공간 단위 i 와 j 의 관측값을 의미한다. \bar{x} 는 관측값의 평균값이며, w_{ij} 는 공간 가중치 행렬을 나타낸다. 공간 단위 i 와 j 가 인접할 경우 $w_{ij} \neq 0$, 그렇지 않을 경우 $w_{ij} = 0$ 이다.

생태 민감성의 냉·열점 공간 분포 상태를 분석하기 위해 지역 공간 자기상관 분석(Local spatial autocorrelation analysis)을 수행하였다. 공식은 다음과 같다(Anselin, 1995).

$$Local\ Moran's\ I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{수식 6}$$

해당 공식의 매개변수 의미는 공식과 동일하다. 지역 Moran's I 지수를 통해 얻을 수 있는 공간 관계는 “고-고”, “고-저”, “저-고”, “저-저” 및 유의하지 않은 다섯 가지 유형으로 나눌 수 있다. 이를 통해 연구 지역 내 생태 민감성의 공간 분포 특성을 보다 직관적으로 파악할 수 있다.

2.4. 생태 민감성 분석도 작성

AHP 계층분석법으로 계산된 생태 인자의 가중치를 ArcGIS 래스터 계산을 사용해 종합 생태 민감성 분석 지도를 작성하였다. 공간 자기상관 분석을 통해 민감

성의 공간적 집적을 파악하고, 이를 바탕으로 세부적인 보호 전략을 수립하였다. 또한, GIS로 시각화된 민감성 지도를 제작하여 의사결정자가 지역별 민감성 수준을 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 각 인자의 가중치 결정

본 연구에서는 계층분석법(AHP)을 사용하여 각 인자의 가중치를 결정하고, 전문가 평가법을 통해 데이터의 신뢰성을 더욱 높였다. 먼저 판단행렬을 작성한 후,

수식 1과 수식 2를 통해 계산하였으며, 최종적으로 수식 3을 이용하여 CR 값을 도출하였다. $CR=0.061 < 0.1$ 인 경우 사용 요구를 충족한다(Table 5). 분석 결과는 다음과 같다.

AHP 방법의 계산 결과에 따르면, 식생 피복 지수(0.4576), 토지 이용 유형(0.1992), 수역 완충지대(0.1295)가 생태 민감성에 주요한 영향을 미치는 요인으로 식별되었으며, 경사도(0.0527), 고도(0.1245), 향(0.0366)와 같은 기타 요인의 영향은 상대적으로 낮게 나타났다(Table 4). 이는 생태계가 식생 피복률과 토지 이용 방식의 변화에 더 민감하게 반응하며, 향과 고도가

Table 4. AHP analysis results

z	Slope	Altitude	Slope aspect	Water buffer zone	Vegetation cover index	Land use type	Weighting values
Slope	1	0.2476	2.6009	0.3511	0.1486	0.1961	0.0527
Altitude	4.0384	1	4.1333	1.2376	0.2139	0.2595	0.1245
Slope aspect	0.3844	0.2419	1	0.2152	0.1585	0.2335	0.0366
Water buffer zone	2.8481	0.8080	4.6460	1	0.2573	0.5276	0.1295
Vegetation cover index	6.7253	4.6735	6.3063	3.8864	1	3.6700	0.4576
Land use type	5.0970	3.8532	1.8953	1.8953	0.2724	1	0.1992

Table 5. AHP test results

Consistency index(CI)	Random index(RI)	Consistency ratio(CR)	Eigenvector
0.0758	1.24	0.061	6.379

Table 6. Area and proportion of ecological factors by sensitivity levels

Factors	Unit	Very low sensitivity	Low sensitivity	Moderate sensitivity	High sensitivity	Very high sensitivity
Slope	Area (ha)	29963.97	34624.42	53210.89	13430.90	1.01
	Proportion (%)	22.83	26.38	40.55	10.23	0.00
Altitude	Area (ha)	60833.75	39095.37	60833.75	5959.45	1017.41
	Proportion (%)	46.13	29.65	18.92	4.52	0.77
Aspect	Area (ha)	16380.50	32197.06	37845.56	31793.07	13015.00
	Proportion (%)	12.48	24.53	28.84	24.23	9.92
Water buffer zone	Area (ha)	111676.47	6501.73	6727.72	4146.80	2807.33
	Proportion (%)	84.69	4.93	5.10	3.14	2.13
Vegetation cover index	Area (ha)	726.46	15268.45	21384.34	31504.67	62979.61
	Proportion (%)	0.55	11.58	16.22	23.89	47.76
Land use type	Area (ha)	24212.30	12894.86	19676.16	1828.81	73248.05
	Proportion (%)	18.36	9.78	14.92	1.39	55.55

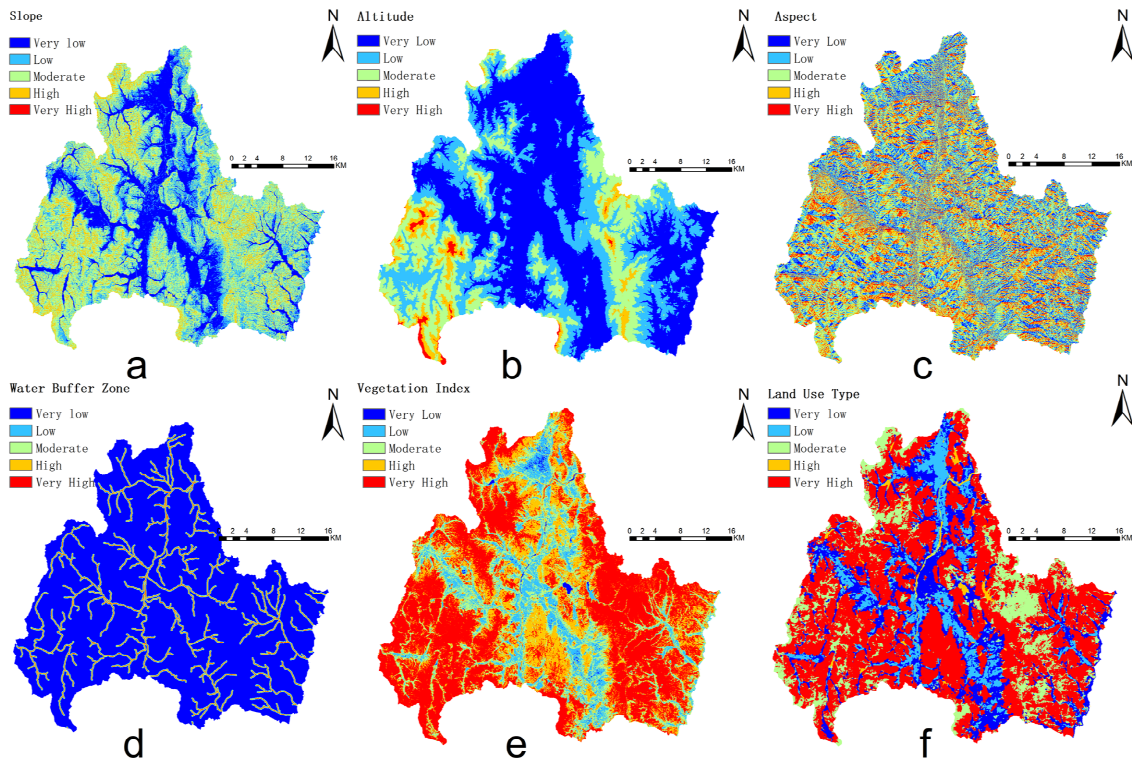


Fig. 3. Single factor ecological sensitivity analysis chart.

민감성 분포에 미치는 기여는 상대적으로 작음을 보여 준다.

3.2. 단일 생태 인자 분석

민감성 분류 기준(Table 2)에 따라 재분류 도구를 사용하여 단일 인자를 분류하여 단일 인자의 민감성 분포 지도(Fig. 3a~f)를 작성하고 면적 및 비율을 산출하였다(Table 6). AHP 분석법과 중첩 분석을 통해 연구 지역의 종합 생태 민감성 지도(Fig. 3)를 도출하고 공간 분포 분석을 수행하였다. 이후 공간 자기상관 분석을 통해 공간 집적성을 바탕으로 연구 지역 생태 민감성의 공간 분포 특성을 더불어 분석하였다.

3.2.1. 경사도 민감성 분석

분석 결과(Fig. 3a)에 따르면, 경주시의 경사도는 전반적으로 완만하며, 보통민감성 구역이 전체 면적의 40.55%를 차지한다. 이 구역은 주로 서부와 동부의 구

릉 및 산악지대에 분포한다. 극저민감성 구역(22.83%)은 형산강 유역과 북부 계곡에 위치하며, 약간민감성 구역(26.38%)은 극저민감성 구역 주변에서 완충 역할을 한다. 매우민감성 구역(10.23%)은 동서 산악지대에 분포하며, 특히민감성 구역은 면적이 극히 적다(1 ha).

3.2.2. 고도민감성 분석

고도는 온도, 강수량 등 기후 요소와 밀접하게 연관되며, 동식물 군락과 종 다양성에 영향을 미친다(Pinto-Junior et al., 2020). 일반적으로 고도가 높을수록 생태 민감성이 증가한다(Wang et al., 2008).

Fig. 3b에 나타난 고도 민감성 분석 결과, 극저민감성 구역(46.13%)이 가장 넓으며 주로 중부와 북부 평야에 위치한다. 약간민감성 구역(29.65%)은 동서 산악지대에, 보통민감성 구역(18.92%)은 평야와 산악지 경계에 분포한다. 매우민감성(4.52%) 및 특히민감성 구역(0.77%)은 면적이 적으며, 경주시의 생태 민감성은 대체로 낮은 고도 지역에서 낮은 수준을 보인다.

3.2.3. 향 민감성 분석

향에 따른 민감성 분석 결과(Fig. 3c), 보통민감성 구역(28.84%)이 가장 넓게 분포하며, 주로 정동 및 정서 방향을 따라 나타난다. 약간민감성 구역(24.53%)과 매우민감성 구역(24.23%)은 비슷한 비율로 나타나며, 극저민감성 구역(12.48%)은 면적이 가장 적다. 특히민감성 구역(9.92%)은 북향 경사면에 위치하며, 이로 인해 식생 생장이 제한된다.

3.2.4. 수역 완충지대 민감성 분석

분석 결과(Fig. 3d)에 따르면, 극저민감성 구역(84.69%)이 대부분을 차지하며, 약간민감성 구역(4.93%)이 그 뒤를 잇는다. 보통민감성 구역(5.10%), 매우민감성 구역(3.14%), 특히민감성 구역(2.13%)은 상대적으로 적은 면적을 차지한다. 경주시는 수역 생태 완충 구역을 설정하고 수변 환경 보호와 수질 관리를 강화할 필요가 있다.

3.2.5. 식생 피복지수 민감성 분석

식생 피복 지수(NDVI)는 식생 피복률을 수치화한 지표로, 식생 피복률이 높을수록 생태 민감성도 높아진다(Choi et al., 2014).

분석 결과(Fig. 3e)에 따르면, 극저민감성 구역(0.55%)과 약간민감성 구역(11.58%)은 대부분 도시와 농업 지역에 분포하며, 인간 활동에 대한 반응이 느리다. 보통민감성 구역(16.22%)과 매우민감성 구역(23.89%)은 평야와 산악지 경계에 위치해 식생 피복률이 높다. 특히민감성 구역(47.76%)은 경주시의 높은 식생은 생태 민감성이 특히 높은 상태성을 나타낸다.

3.2.6. 토지 이용 유형 민감성 분석

토지 이용 유형은 자연요소 간의 상호작용을 반영하며, 특히 토지 생산성을 평가하는 중요한 요소이다.

토지 이용 유형 분석 결과(Fig. 3f), 특히민감성 구역(55.55%)이 가장 넓으며, 산림지역과 주요 수역에 위치한다. 극저민감성 구역(18.36%)은 건조지역에 집중되어 있으며, 약간민감성 구역(9.78%)과 보통민감성 구역(14.92%)은 농업지역과 초지에 위치한다.

3.3. 종합 생태민감성 분석

본 연구에서는 여섯 가지 생태 인자의 민감성 분석 결과를 GIS 가중 중첩 분석을 통해 결합하고, 자연 구분법을 적용해 민감도 등급에 따라 재분류하였다. 이로써 경주시 생태 민감성 종합 분석도(Fig. 4), 생태 민감성 등급면적 분포도(Fig. 5)와 민감성 비율표(Table 7)를 도출하였다. 그리고 행정구역의 생태민감성 비율을 분석하였다(Table 8).

분석 결과, 경주시의 생태 민감성은 전체적으로 높은 수준을 보이며, 민감성 등급면적은 W자 형태로 분포한다(Fig. 4). 특히민감성 구역(38.77%, 50878.27 ha)은 주로 고해발 지역과 높은 식생 피복률을 가진 산악 지역에 집중되어 있으며, 이들 지역은 높은 생태적 가치를 지니는 동시에 매우 취약한 생태계를 가지고 있다. 따라서 기존 보호구역의 확장이나 새로운 보호구역 지정이 필요하며, 동식물 보호, 수도 유지 및 생태 복원을 중심으로 한 연구가 진행되어야 한다. 필요하면 보호구역 주변에 완충 구역을 설정하여 보호 강화를 도모할 것을 권장한다. 이러한 조치는 해당 지역의 장기적인 생태적 안정성을 확보하는 데 기여할 것이다.

매우민감성 구역(28.82%, 37813.12 ha)은 생태적으로 중요한 지역으로, 해당 지역 내 생태계가 훼손되지 않도록 보호에 중점을 두어야 한다. 이를 위해 정기적인 모니터링 시스템을 구축하고, 지역별 특성에 맞는 맞춤형 보호 전략을 수립하는 것이 필요하다. 또한, 이 지역의 생태적 가치를 보존하기 위해 법적 보호 지위를 강화하고 외부 간섭을 최소화하는 정책을 시행해야 한다.

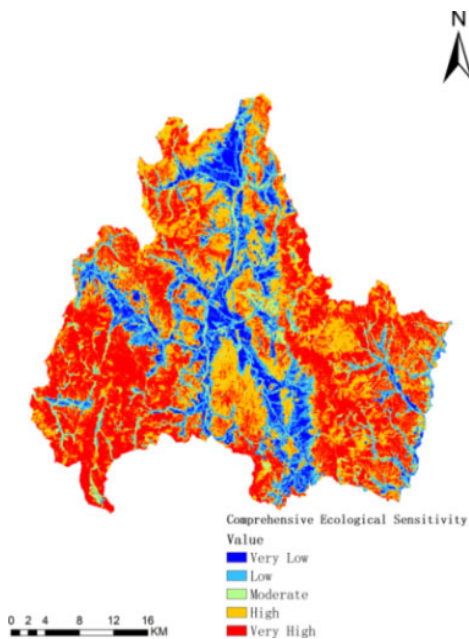
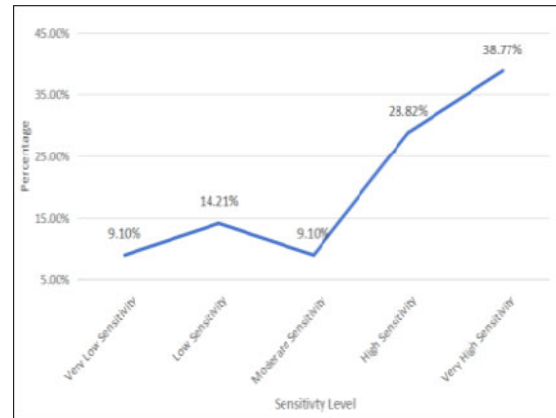
보통민감성 구역(9.10%, 11949.06 ha)은 낮은 민감성 구역과 높은 민감성 구역의 경계 지역에 위치하며, 완충 구역으로서의 역할을 한다. 이 지역에서는 원시 생태계를 보존하면서도, 소규모 정밀 개발 방식을 통해 지속 가능한 개발을 추진할 수 있다. 예를 들어, 자연 친화적인 소규모 관광 시설이나 녹지 개발을 진행할 수 있다.

약간민감성 구역(14.21%, 18641.80 ha)은 하천을 따라 분포하며, 수변의 특성을 활용할 수 있는 잠재력을 가진 지역이다. 이 구역에서는 강변 공원과 같은 수변 기반의 녹지 공간을 조성하여 지역 주민과 관광객 모두를 위한 친환경 공간으로 활용할 것을 권장한다. 동시에 하천 보호를 위해 수질 관리와 생태적 완충 기능을 강화하는 보호 조치가 필요하다.

극저민감성 구역(9.10%, 11935.23 ha)은 연구 지

Table 7. Comprehensive ecological sensitivity ratio

Sensitivity level	Area/ha	Proportion/%
Very low sensitivity	11935.23	9.10
Low sensitivity	18641.80	14.21
Moderate sensitivity	11949.06	9.10
High sensitivity	37813.12	28.82
Very high sensitivity	50878.27	38.77
Total	131217.47	100

**Fig. 4.** Comprehensive ecological sensitivity.**Fig. 5.** Ecological sensitivity classification distribution chart.

역 중심의 평야와 계곡 지대에 주로 분포하며, 지형이 평탄하고 해발이 낮은 특징을 보인다. 해당 구역은 주로 건설용지와 농업용지로 구성되어 있으며, 기존 관광업 기반 위에서 추가적인 개발이 가능하다. 그러나 생태적 가치가 상대적으로 낮은 문제를 고려하여, 양후 계획에서는 식생 피복률을 확대하고 환경 복원을 우선 해야 한다.

3.4. 생태민감성 공간 자기상관 분석

3.4.1. 모란 지수 (Moran's I) 분포

Geoda와 ArcGIS를 활용하여 경주시 생태 민감성에 대한 공간 자기상관 분석을 수행한 결과는 그림과

같다 (Fig. 6). 전역 공간 자기상관 모란 지수는 0.930으로, 연구 지역의 생태 민감성이 양의 공간 자기상관성을 가지며 공간적 집적성을 나타내는 상태임을 확인하였다.

대부분의 점은 1사분면과 3사분면에 분포하고 있으며, 이는 고민감 지역과 저민감 지역이 각각 유사한 민감성을 가진 지역으로 둘러싸여 있음을 나타낸다. 즉, 이러한 지역의 민감성은 양의 상관관계를 가지고 있다. 그러나 일부 점은 2사분면과 4사분면에 분포하고 있으며, 이는 고민감 지역과 저민감 지역이 서로 반대 상태의 지역으로 둘러싸여 있음을 나타낸다. 이로 인해 일부 지역에서는 음의 상관관계가 나타난다.

Table 8. Ecological sensitivity by administrative region

Administrative region	Unit	Very low sensitivity	Low sensitivity	Moderate sensitivity	High sensitivity	Very high sensitivity
Angangeup	Area(ha)	1671.71	1880.33	1186.06	5144.94	3856.08
	Proportion(%)	12.17	13.69	8.63	37.45	28.07
Gangdongmyon	Area(ha)	992.93	1697.58	953.43	2525.30	1852.09
	Proportion(%)	12.38	21.16	11.89	33.48	23.09
Somyon	Area(ha)	301.24	774.00	605.81	1390.28	2045.61
	Proportion(%)	5.89	15.13	11.84	27.17	39.98
Hyongongmyon	Area(ha)	561.10	861.14	554.89	1708.94	1854.43
	Proportion(%)	10.13	15.54	10.02	30.84	33.47
Chonbungmyon	Area(ha)	803.57	1293.55	742.29	1881.90	1104.32
	Proportion(%)	13.79	22.20	12.74	32.30	18.96
Gonchoneup	Area(ha)	936.79	1427.98	689.84	1586.76	4489.00
	Proportion(%)	10.26	15.64	7.56	17.38	49.17
Sinaedongjigu	Area(ha)	3008.90	3788.49	2149.77	7131.83	5882.24
	Proportion(%)	13.70	17.25	9.79	32.47	26.78
Munmudaewangmyon	Area(ha)	318.13	857.16	901.37	3409.73	6441.93
	Proportion(%)	2.67	7.19	7.56	28.59	54.01
Gampoeup	Area(ha)	109.07	412.50	499.34	1335.30	2040.09
	Proportion(%)	2.48	9.38	11.36	30.37	46.40
Sannaemyon	Area(ha)	81.28	644.94	1091.30	2343.24	9993.17
	Proportion(%)	0.57	4.56	7.71	16.56	70.60
Naenammyon	Area(ha)	627.30	1351.88	958.89	3665.60	5457.01
	Proportion(%)	5.20	11.21	7.95	30.39	45.25
Wedongeup	Area(ha)	1931.16	2573.71	1047.45	2295.12	3060.51
	Proportion(%)	17.70	23.59	9.60	21.04	28.06
Yangnammyon	Area(ha)	269.94	811.70	858.70	2217.73	4248.29
	Proportion(%)	3.21	9.66	10.21	26.38	50.54

3.4.2. 지역 공간 자기상관 분석

지역 공간 자기상관의 클러스터링 및 이상값 분석 결과(Fig. 7)에 따르면, 연구 지역 주변 일부의 생태 민감성은 고-고 클러스터링 상태를 보이며, 이는 핫스팟 지역임을 나타낸다. 따라서 이 지역은 주요 생태 보호 구역으로 지정되어야 한다. 북부, 중남부, 서부 및 중부 지역은 저-저 클러스터링 지역으로, 즉 콜드스팟 지역이다. 이러한 지역은 지속 가능한 개발이라는 개념을 바탕으로 적절한 개발이 가능하다.

고-저 클러스터링 지역과 저-고 클러스터링 지역은 연구 지역 내에 산발적으로 분포하고 있으며, 이는 인위적 개입에 의해 형성된 것으로 보인다. 이들 지역은 형

성 원인을 파악하기 위해 현장 조사가 필요하며, 주변 환경의 영향을 크게 받고 있음을 시사한다. 그 외 지역은 클러스터링 상태가 뚜렷하지 않고 공간 자기상관성이 미약하여, 해당 지역의 생태 민감성이 다른 지역에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

공간 자기상관 분석 결과, 특히 민감성 구역과 매우 민감성 구역은 동부와 서부의 산림 지역에 집중되어 있는 주요 핫스팟으로 확인되었다. 이러한 지역은 정책적으로 인간 활동을 제한하고, 동내 홍보를 통해 보호 의식을 높이는 조치가 필요하다. 반면, 콜드스팟 지역은 식생피복률이 낮고 도시 건설용지가 많은 지역에 집중되어 있어 적절한 계획과 생태 복원을 통해 해당 지역

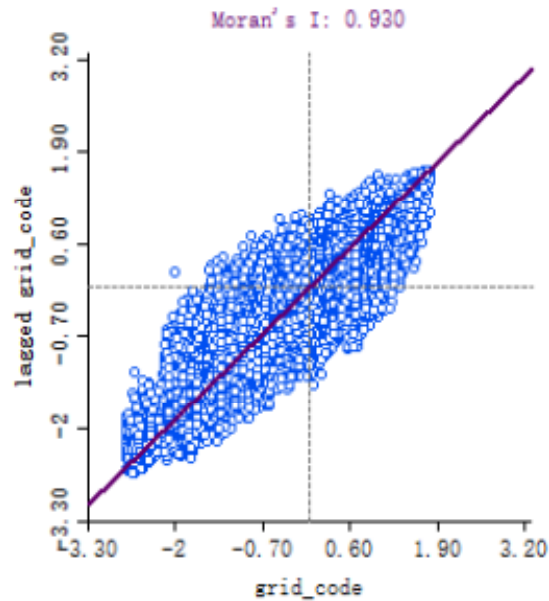


Fig. 6. Moran's I scatter plot.

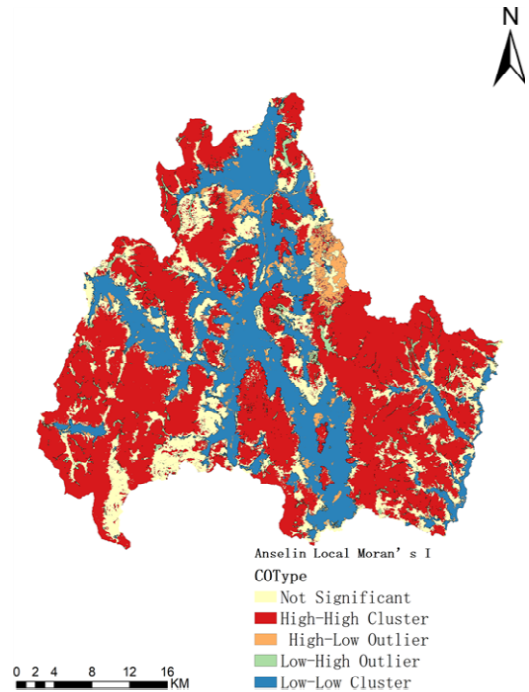


Fig. 7. Local spatial autocorrelation.

의 생태 기능을 강화할 필요가 있다. 특히 주목할 점은 고-저(High-Low) 및 저-고(Low-High) 지역이 주변 지역의 밀집 상태와 다르다. 특히 연구 지역의 북동부와 북서부에 위치한 "고-저" 지역은 높은 민감성 지역으로 둘러싸인 낮은 민감성 지역이다. 이러한 지역은 우선적으로 생태 상태를 안정화하여 추가 악화를 방지해야 하며, 이후 지역 특성에 맞는 맞춤형 생태 복원을 통해 해당 지역의 생태계를 회복시키는 방안을 강구해야 한다.

4. 결론

본 연구는 GIS 기술과 AHP 계층분석법을 결합하여 경주시의 생태 민감성 체계를 구축하고 평가하였다. DEM 위성 영상과 토지 이용 데이터를 기반으로 각각 ArcGIS 10.8과 ENVI 5.3을 활용하여 데이터를 처리 및 분석하였다. AHP 계층분석법을 통해 평가 행렬을 구성하고, 각 민감성 인자를 정량적으로 분석하여 평가 결과를 다섯 가지 민감성 등급으로 구분한 후, 경주시 생태 민감성 평가의 종합적인 결과를 도출하였다. 이를

바탕으로 공간 자기상관 분석 기법을 추가적으로 활용하여 연구 지역의 생태 민감성 공간 분포 특성을 규명하였다. 본 연구는 경주시의 환경 보호 및 도시 계획에 필요한 과학적 근거와 기초 자료를 제공에 그 목적이 있다. 결과가 다음과 같다.

첫째, 경주의 생태 민감성은 전반적으로 높은 수준을 보이며, 동시에 큰 다양성을 지니고 있다. 이러한 다양성은 다음 네 가지 측면에서 구체적으로 나타난다.

1. 공간 분포의 다양성이다. 이는 서로 다른 민감성 구역들이 교차적으로 분포하는 형태로 나타나며, 민감성의 공간적 이질성을 반영한다.
2. 각 요인의 민감성 다양성이다. 서로 다른 요인의 상대적 중요성은 지역에 따라 상이하게 나타나며, 이러한 요인들이 상호 교차하고 영향을 주고받으면서 경주의 생태계가 지니고 있는 이질성과 복잡성을 드러낸다.
3. 냉·하스팍의 다양성이다. 결과에 따르면 연구 지역 내에서 냉·하스팍의 분포가 뚜렷하게 나타났으며,

이는 경주의 생태 민감성이 지역별로 이질적인 특성을 보임을 추가적으로 입증한다.

4. 민감성 등급의 다양성이다. 민감성 등급의 면적 비율은 각각 9.10%, 14.21%, 9.10%, 28.82%, 38.77%로 나타났으며, 분석 결과에 따르면 민감성 등급이 공간적으로 낮은 지역에서 높은 지역으로, 중심부에서 외곽으로 계단식 상승하는 분포를 보인다. 또한 일부 지역에서는 민감성이 급격히 변화하는 특성이 확인되었다. 이는 연구 지역의 생태 민감성이 매우 복잡하다는 점을 반영한다.

따라서 경주의 생태 민감성은 전반적으로 높은 수준을 보이며, 공간적 분포에서 뚜렷한 다양성을 나타낸다. 이러한 다양성은 자연적 요인과 인간 활동의 상호작용을 반영할 뿐만 아니라, 지역별 민감성 상태의 차이를 잘 보여준다. 이에 따라 향후 생태 보호 계획에서는 유연한 분할 관리와 지역 특성에 맞는 맞춤형 전략을 적용할 필요가 있다.

둘째, 본 연구는 AHP 분석을 통해 경주시 생태 민감성에 영향을 미치는 주요 요인으로 식생 피복 지수(0.4576), 토지 이용 유형(0.1992), 수역 완충지대(0.1295)를 확인하였다. 전문가 설문을 활용한 가중치 도출은 분석 결과의 신뢰성을 높였으며, 민감성 지역의 분포와 그 요인을 효과적으로 설명하였다.

셋째, 연구 지역의 생태 민감성은 높은 공간 자기상관성을 보이는 것으로 나타났다. 고공간 자기상관성을 보이는 지역은 주로 동부, 서부, 남부 및 북부의 일부 지역에 분포하고 있으며, 이러한 지역은 생태 관리와 보호에서 우선적으로 주목받아야 한다. 향후 생태 보호 계획에서는 핫스팟 지역을 우선적으로 고려하여, 보다 신속하고 정밀한 보호 전략을 실행하는 것이 중요하다. 이를 통해 민감성이 높은 지역의 생태 기능을 효과적으로 유지하고, 생태계의 안정성을 더욱 강화할 수 있을 것이다.

본 연구는 향후 평가 인자 선택에서 기후 및 토양과 관련된 환경적 인자를 추가하여 평가 체계의 포괄성을 한층 강화할 계획이다. 또한, 위성 영상을 활용함에 있어 장기간에 걸친 모니터링 데이터를 도입함으로써 식생 피복 지수 산정의 정확도를 더욱 높이고자 한다.

REFERENCES

- Anselin, L., 1995, Local indicators of spatial association—LISA, *Geogr. Anal.*, 27(2), 93-115.
- An, W., Wang, B., Duan, L., et al., 2023, Emerging contaminants in the northwest area of the Tai Lake Basin, China: Spatial autocorrelation analysis for source apportionment and wastewater-based epidemiological analysis, *Sci. Total Environ.*, 865, 161176.
- Al Waeli, A. M. T., Al-Azawi, F. W., Hamid, H. M., 2024, Evaluation of the sensitivity of AL-Husseiniya soils in Karbala to erosion using Landsat sensors, *Environ. Challenges*, 100857.
- Akbar, T. A., Javed, A., Ullah, S., et al., 2022, Principal component analysis (PCA)-geographic information system (GIS) modeling for groundwater and associated health risks in Abbottabad, Pakistan, *Sustainability*, 14(21), 14572.
- Choi, S. K., Lee, S. K., Wang, B., 2020, Analysis of vegetation cover fraction on Landsat OLI using NDVI, *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, 32(1), 9-17.
- Chen, M., Xu, X., Tan, Y., et al., 2024, Assessing ecological vulnerability and resilience-sensitivity under rapid urbanization in China's Jiangsu province, *Ecol. Indic.*, 167, 112607.
- Guo, N., 2003, Vegetation index and its advances, *J. Arid Meteorol.*, 21(4), 71.
- He, L., Shen, J., Zhang, Y., 2018, Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management, *J. Environ. Manage.*, 206, 1115-1125.
- Hamad, K. O., Surucu, A., 2024, Land degradation sensitivity and desertification risk in Harrir region, northern Iraq, *Heliyon*, 10(5), e27123.
- Hu, X., Ma, C. M., Huang, P., Guo, X., 2021, Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection—a case of Weifang City, China, *Ecol. Indic.*, 125, 107464.
- Han, M., Sun, R., Feng, P., et al., 2023, Unveiling characteristics and determinants of China's wind power geographies towards low-carbon transition, *J. Environ. Manage.*, 331, 117215.
- Li, A., Wang, A., Liang, S., et al., 2006, Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS—a case study in the upper reaches of Minjiang River, China, *Ecol. Model.*, 192(1-2), 175-187.
- Liu, J., Gao, J., Ma, S., et al., 2015, Evaluation of

- ecological sensitivity in China, *J. Nat. Resour.*, 30(10), 1607-1616.
- Li, B., Han, L., Li, L., 2024, Construction of ecological security pattern in combination with landslide sensitivity: A Case study of Yan'an City, China, *J. Environ. Manage.*, 366, 121765.
- Nguyen, A. K., Liou, Y. A., Li, M. H., et al., 2016, Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection, *Ecol. Indic.*, 69, 100-117.
- Ouyang, Z. Y., Wang, X., Miao, H., 2000, China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity, *Acta Ecol. Sin.*, 20(1), 9-12.
- Oh, J. H., You, J. H., Kim, K. T., Lee, W. S., 2011, Risk assessment of soil erosion in Gyeongju using RUSLE method, *J. Environ. Impact Assess.*, 20(3), 313-324.
- Pathak, D., Maharjan, R., Maharjan, N., Shrestha, S. R., Timilsina, P., 2021, Evaluation of parameter sensitivity for groundwater potential mapping in the mountainous region of Nepal Himalaya, *Groundw. Sustain. Dev.*, 13, 100562.
- Pinto-Junior, H. V., Villa, P. M., de Menezes, L. F. T., Alvarez Pereira, M. C., 2020, Effect of climate and altitude on plant community composition and richness in Brazilian inselbergs, *J. Mount. Sci.*, 17(8), 1931-1941.
- Qin, X., Yang, Q., Wang, L., 2024, The evolution of habitat quality and its response to land use change in the coastal China, 1985-2020, *Sci. Total Environ.*, 952, 175930.
- Ryu, J. H., Moon, H. D., Lee, K. D., et al., 2024, Evaluation of surface reflectance and vegetation indices measured by Sentinel-2 satellite using drone considering crop type and surface heterogeneity, *Korean J. Remote Sens.*, 40(5), 657-673.
- Saaty, T. L., 1990, How to make a decision: The analytic hierarchy process, *Eur. J. Oper. Res.*, 48(1), 9-26.
- Saaty, T. L., 1977, A Scaling method for priorities in hierarchical structures, *J. Math. Psychol.*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T. L., 2001, *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*, Springer.
- Saaty, T. L., 2004, Decision making-the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP), *J. Syst. Sci. Syst. Eng.*, 13, 1-35.
- Shin, H. S., Jang, J. E., Lee, S. C., Kwon, H. Y., Kim, G. R., Jang, J., Choi, S. H., 2024, Establishing habitat quality criteria for the ecosystem services InVEST model using AHP techniques, *Korean J. Environ. Ecol.*, 38(1), 67-78.
- Tran, H. H., Van Tran, A., Le, N. T., 2020, Study on land use changes, causes and impacts by remote sensing, GIS and Delphi methods in the coastal area of Ca Mau province in 30 years, *J. Min. Earth Sci.*, 61(4), 36-45.
- Tsou, J. Y., Gao, Y., Zhang, Y., et al., 2017, Evaluating urban land carrying capacity based on the ecological sensitivity analysis: A Case study in Hangzhou, China, *Remote Sens.*, 9(6), 529.
- Wan, L., Tong, J., Zhou, J., et al., 2016, Variation of vegetation ecological water consumption and its response to vegetation coverage changes in the rocky desertification areas in South China, *Plos One*, 11(10), e0163566.
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, S. Z., et al., 2008, Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method, *J. Arid Environ.*, 72(10), 1929-1939.
- Wei, W., Li, Z., Xie, B., Zhou, J., Guo, Z., 2020, Spatial distance-based integrated evaluation of environmental sensitivity for ecological management in northwest China, *Ecol. Indic.*, 118, 106753.
- Xu, Y., Liu, R., Xue, C., et al., 2023, Ecological sensitivity evaluation and explanatory power analysis of the Giant Panda National Park in China, *Ecol. Indic.*, 146, 109792.
- Xue, L., Wang, J., Zhang, L., et al., 2019, Spatiotemporal analysis of ecological vulnerability and management in the Tarim River Basin, China, *Sci. Total Environ.*, 649, 876-888.
- Yilmaz, F. C., Zengin, M., Tekin Cure, C., 2020, Determination of ecologically sensitive areas in Denizli province using geographic information systems (GIS) and analytical hierarchy process (AHP), *Environ. Monit. Assess.*, 192(9), 589.
- Zheng, Y., Lan, S., Chen, W. Y., et al., 2019, Visual sensitivity versus ecological sensitivity: An Application of GIS in urban forest park planning, *Urban For. Urban Green.*, 41, 139-149.
- Environmental Systems Research Institute, Inc., 2022, Living Atlas, <https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/#mapCenter=129.20539%2C35.85283%2C13.751020720384867&mode=step&timeExtent=2017%2C2023&year=2022>.
- United States Geological Survey (USGS), 2022, Landsat 8 collection 2 level-2 data product, Scene ID: LC08_L2S_P_114035_20220525_02_T1, <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Date Accessed: June 10, 2023.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2023, AW3 D30 DSM (30 m Global digital surface model), https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/aw3d30/aw3d30_j.htm.

National Geographic Information Institute, 2024, <https://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do>.

Wikipedia Korea, 2024, <https://ko.wikipedia.org/wiki/%EA%B2%BD%EC%A3%BC%EC%8B%9C>.

-
- Professor, Sang-Hyun Heo
Department of Landscape Architecture and Garden Design, WISE Campus, Dongguk University
hsh@dongguk.ac.kr
 - Master's and Doctor's course. Zheng Wang
Department of Landscape Architecture, Graduate school, WISE Campus, Dongguk University
hunimase1@gmail.com