

제주시 해안 저지대의 평균 지표면 온도와 지형·도시공간 특성의 관계 분석

Analysis of the Relationship between Mean Land Surface Temperature and
Topographic-Urban Spatial Characteristics in the Coastal Lowlands of Jeju City

손주형 Son Juhyeong*, 정종철 Jeong Jongchul**

Abstract

This study analyzes the relationship between land surface temperature (LST) and topographic and urban-spatial characteristics in the coastal lowlands of Jeju City using Landsat-derived LST data and an XGBoost-SHAP framework. The study area was limited to the Jeju-si Dong area below 300 m elevation, and LST values from seven autumn observation dates between 2015 and 2021 were aggregated into 500 m × 500 m grids. After excluding grids with insufficient valid LST pixels, 487 grids were used for analysis. The mean LST ranged from 11.17 to 18.61°C, with an overall mean of 15.08°C. To address the high negative correlation between urban area ratio and vegetated land-cover ratio, this study compared the original model, a model excluding vegetated land-cover ratio, and a revised model including coastal distance. The final revised model (M2) used mean elevation, urban area ratio, coastal distance, bare land ratio, and water area ratio as input variables. The M2 model showed stable predictive performance, with $R^2=0.843$, $RMSE=0.576^{\circ}C$, and $MAE=0.418^{\circ}C$ for the test data. The SHAP analysis indicated that urban area ratio contributed most to mean LST prediction, followed by mean elevation and coastal distance. Urban area ratio increased predicted LST, whereas mean elevation reduced it. Coastal distance had a lower relative contribution but served as a complementary variable representing the coastal-inland spatial gradient of Jeju City's coastal lowlands. These findings provide a grid-based interpretation of thermal characteristics in Jeju City's coastal lowlands and offer basic information for urban thermal environment management and land-use planning.

Keywords: Land Surface Temperature, XGBoost-SHAP, Landsat, Coastal Lowlands, Coastal Distance

I. 서론

지표면 온도(Land Surface Temperature: LST)는 지표의 물리적 특성, 지형 조건, 토지피복, 대기 상태 등 다양한 요인의 영향을 받아 공간적으로 불균질한

분포를 형성한다. 동일한 기후조건하에서도 지역별 고도, 토지피복 구성, 불투수면 분포, 식생 피복 비율 등에 따라 LST의 공간적 패턴은 다르게 나타날 수 있다. 특히 산지와 해안 저지대, 시가화지역과 농업 지역이 함께 분포하는 지역에서는 지표면 열환경이

* 남서울대학교 드론공간정보공학과 석사과정(제1저자) | Master's Student, Dept. of Drone-GIS, NamSeoul Univ | Primary Author | gundamju@naver.com

** 남서울대학교 드론공간정보공학과 교수(교신저자) | Prof., Dept. of Drone-GIS, NamSeoul Univ. | Corresponding Author | jjc1017@gmail.com

단일 요인으로 설명되기 어렵기 때문에, 지형 및 토지 피복 조건을 함께 고려한 분석이 필요하다.

제주도는 한라산을 중심으로 고도 변화가 뚜렷하고, 해안 저지대와 내륙 고지대가 비교적 짧은 거리 안에서 연결되는 화산섬 지역이며, 다양한 화산지형과 오름이 분포하며, 지형 및 방위 조건에 따라 국지적인 기온 분포가 달라질 수 있음이 보고된 바 있다(서희철, 전승증, 윤진일 2008; 이정현, 윤성호 2012). 그리고 오름과 같은 화산지형을 대상으로 고해상도 위성영상을 활용하여 온도 변화를 모니터링한 연구도 수행된 바 있어, 제주 지역의 지형적 특성과 원격탐사 기반 열환경 분석의 연계 가능성을 보여준다(Yoon, Ahn, Kim and Han et al. 2022).

제주도는 해안부를 중심으로 시가화지역, 농업지역, 도로, 나지, 산림 등이 복합적으로 분포하고 있어, 동일한 섬 지역 내에서도 지형 및 토지피복 조건에 따라 LST의 차이가 발생할 가능성이 높다. 이러한 특성은 제주도가 지형과 토지피복 구성에 따른 LST 분포 특성을 분석하기에 적합한 지역임을 보여준다.

기존의 지표면 온도 연구는 주로 도시열섬 현상을 중심으로 수행되어 왔으며, 건물 밀도, 불투수면, 식생지수, 토지이용 등 도시화 요인과 LST의 관계를 분석하는 데 초점을 두었다. 이러한 연구들은 대도시 지역의 열환경을 설명하는 데 유용하지만, 제주도와 같이 자연지형과 도시·농업적 토지이용이 함께 나타나는 지역에서는 고도와 토지피복 구성이 복합적으로 작용하는 공간적 특성을 함께 고려할 필요가 있다. 또한 위성영상에서 산출된 LST를 개별 픽셀 단위로 직접 분석할 경우 인접 픽셀 간 유사성이 강하게 반영될 수 있으므로, 일정 공간 단위로 집계하여 해석 가능한 분석 단위를 설정하는 것이 중요하다.

이에 본 연구는 지표면 온도와 도시공간 특성의 해석 가능성이 높은 제주시의 해안 저지대를 중심으로 연구 범위를 설정하였다. 본 연구에서 제주도 동지

역은 제주시 행정구역 중 읍·면 지역을 제외한 동 단위 행정동 지역을 의미한다. 제주시 동지역의 해발 300m 이하 지역은 해안과 인접한 도시지역, 농업지역, 초지, 산림 등이 비교적 짧은 거리 안에서 함께 분포하며, 해안에서 한라산 방향으로 이어지는 고도 변화가 나타나는 공간이다. 따라서 이 지역의 평균 LST를 해석하기 위해서는 단순한 토지피복 구성뿐만 아니라 저지대 내부의 고도 차이, 시가화지역의 분포, 해안과의 거리와 같은 공간적 조건을 함께 고려할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 Landsat 위성영상 기반 LST 자료를 활용하여 제주시 동지역 중 해발 300m 이하 해안 저지대의 평균 LST 공간 분포를 파악하고, 500m 격자 단위에서 평균 고도, 시가화지역 비율, 해안거리 등 지형·도시공간 특성과 평균 LST의 관계를 분석하는 것이다. 이를 위해 2015~2021년 중 7개 가을철 사례일의 LST를 동일한 격자 체계로 집계하고, XGBoost-SHAP 기법을 활용하여 평균 LST 예측에 기여하는 주요 변수와 그 방향성을 검토하였다. 또한 토지피복 변수 간 중복성 문제를 고려하여 입력 변수 간 상관관계를 함께 검토하고, 제주시 해안 저지대의 열환경 관리와 토지이용 계획에 활용 가능한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 선행연구 고찰

LST는 토지피복, 지형 조건, 도시화 정도 등 다양한 요인에 의해 공간적으로 차이를 보인다. 특히 위성영상 기반 LST는 지표의 열적 특성을 공간적으로 파악할 수 있다는 장점이 있어 도시열섬, 토지피복 변화, 지형 조건에 따른 열환경 분석에 널리 활용되어 왔다.

먼저 토지피복 및 도시화 요인과 LST의 관계를 분석한 연구들은 식생 감소와 불투수면 증가가 지표면 온도 상승과 밀접하게 관련됨을 제시하였다. 국내에

서도 공간통계 기법을 활용하여 서울시 지표면온도와 인구 및 사업체 관련 변수 간의 공간적 관계를 분석한 연구가 수행되었으며, 이는 LST가 도시공간 특성과 밀접하게 관련될 수 있음을 보여준다(이창호, 김현덕 2024). 권혁춘, 이병걸(2009)은 Landsat 영상을 활용하여 제주도 도시지역의 지표면 온도와 식생지수 간의 관계를 분석하였으며, 식생 밀도가 높은 지역에서 LST가 낮게 나타나는 경향을 확인하였다. Moazzam, Doh and Lee(2022)는 제주도를 대상으로 토지피복 변화와 도시화가 LST 및 도시열섬 현상에 미치는 영향을 분석하고, 불투수면 증가와 도시지역 확장이 열환경 악화와 관련됨을 제시하였다. Pal and Ziaul(2017) 역시 토지피복 변화와 LST의 관계를 분석하여, 도시화에 따른 불투수면 증가와 식생 감소가 LST 상승과 관련됨을 보고하였다.

지형 요인 역시 LST 분포를 설명하는 중요한 변수로 다루어져 왔다. Moazzam and Lee(2023)는 제주도를 대상으로 고도 및 사면 방향에 따른 LST 분포를

분석하였으며, 고도가 증가할수록 LST가 감소하고 사면 조건에 따라 온도 분포가 달라질 수 있음을 밝혔다. Husain, Kumar and Gonencgil(2023)은 산악지역을 대상으로 토지피복 변화, 고도, 설피복 등이 LST 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, Njoku and Tenenbaum(2022)은 토지피복과 지형 고도가 LST의 공간적 차이를 설명하는 주요 요인임을 확인하였다. 이러한 연구들은 LST가 단순히 도시화 요인만이 아니라 고도, 지형, 식생 및 토지피복 조건의 복합적인 영향을 받는다는 점을 보여준다.

최근에는 LST와 관련 변수 간의 관계가 선형적으로만 나타나지 않는다는 점을 고려하여, 머신러닝 및 설명 가능한 인공지능 기법을 활용한 연구도 증가하고 있다. Kim, Kim and Kim(2022)은 서울을 대상으로 토지피복, 지형 및 경관 변수를 활용하여 LST 예측모형을 구축하고, XGBoost와 SHAP 기반 분석을 통해 LST와 관련 변수 간의 관계를 해석하였다. Wei, Li, Jia and Liu et al.(2025)은 XGBoost-SHAP 모델

표 1 본 연구의 분석 변수 및 방법 설정에 활용한 주요 선행연구

구분	주요 연구	연구 대상	주요 변수 및 방법	주요 결과
국내 도시 LST 관련 요인 분석	Jeong, Shin and An(2025)	서울·대구·인천	LST, NDVI, NDBI, ALBEDO, DEM, SLOPE, XGBoost-SHAP, GWR	도시별 LST 관련 요인이 다르게 나타나며, 지형·환경 특성을 반영한 지역별 해석 필요성 제시
XGBoost-SHAP 기반 도시 열환경 관련 변수 분석	Wei, Li, Jia and Liu et al.(2025)	Hangzhou, China	LST, 지형, 건조환경, 생태·기후 요인, XGBoost, SHAP	도시 열환경 관련 변수의 비선형적 관계와 상대적 중요도를 XGBoost-SHAP으로 분석
지형 요인	Moazzam and Lee(2023)	제주도	고도, 사면방향, LST	고도 증가에 따라 LST가 감소하고, 지형 조건에 따라 온도 분포가 달라짐
지형·토지피복 복합성	Husain, Kumar and Gonencgil(2023)	Lahaul and Spiti, India	LULC, elevation, NDSI, LST	고도, 토지피복, 설피복 등 지형·지표 조건이 LST 변화와 관련됨
토지피복·도시화	Moazzam, Doh and Lee(2022)	제주도	LULC, LST, UHI	도시화 및 불투수면 증가가 LST 상승과 관련됨
XAI 기반 LST 관련 변수 분석	Kim, Kim and Kim(2022)	서울, 대한민국	LULC, 지형, 경관 변수, XGBoost, SHAP	XGBoost-SHAP을 통해 LULC와 LST의 관계를 분석하고, 주변 시가지 및 식생 지역이 주요 관련 변수로 확인됨
토지피복·고도	Njoku and Tenenbaum(2022)	Ilorin, Nigeria	LULC, elevation, LST	토지피복과 고도가 LST의 공간적 차이를 설명하는 주요 요인으로 나타남
토지피복 변화	Pal and Ziaul(2017)	English Bazar, India	LULC, NDVI, LST	도시화와 식생 감소가 LST 상승과 관련됨

을 활용하여 도시 열환경에 영향을 미치는 지형, 건조 환경, 생태·기후 요인의 상대적 중요도와 비선형적 관계를 분석하였다. Jeong, Shin and An(2025)은 한국의 주요 도시를 대상으로 XGBoost-SHAP과 GWR을 결합하여 도시별 LST 관련 요인의 차이와 공간적 이질성을 분석하였다. 이러한 연구들은 XGBoost와 SHAP 분석이 LST와 지형·토지피복 변수 간의 복합적 관계를 해석하는 데 유용함을 보여준다(〈표 1〉 참조).

한편, LST 분석에서 공간 단위의 설정은 연구 결과의 해석에 중요한 영향을 미친다. 위성영상에서 산출된 LST는 픽셀 단위로 제공되지만, 지표면 온도는 물리적으로 연속적인 특성을 가지므로 인접 픽셀 간 유사성이 높게 나타날 수 있다. 따라서 개별 픽셀 값을 그대로 분석 단위로 사용할 경우, 자료 자체의 공간적 연속성이 분석 결과에 과도하게 반영될 가능성이 있다. 이러한 이유로 다수의 LST 연구에서는 행정구역, 일정 규모의 격자, 토지피복 구역 등으로 LST를 집계하여 토지이용 및 환경 요인과의 관계를 분석하고 있다.

기존 제주도 LST 연구들은 도시화, 식생, 고도 등 개별 요인의 중요성을 제시해 왔으나, 제주도 동지역의 해발 300m 이하 해안 저지대를 대상으로 일정 공간 단위에서 평균 LST와 지형·도시공간 특성을 함께 검토한 연구는 상대적으로 제한적이다. 이에 본 연구는 선행연구에서 제시된 LST 관련 요인을 바탕으로 500m 격자 단위의 평균 고도, 시가화지역 비율, 토지피복 구성, 해안거리 변수를 구축하고, 변수 간 중복성을 고려하여 제주도 해안 저지대의 평균 LST와 주요 공간 특성 간의 관계를 검토하고자 한다.

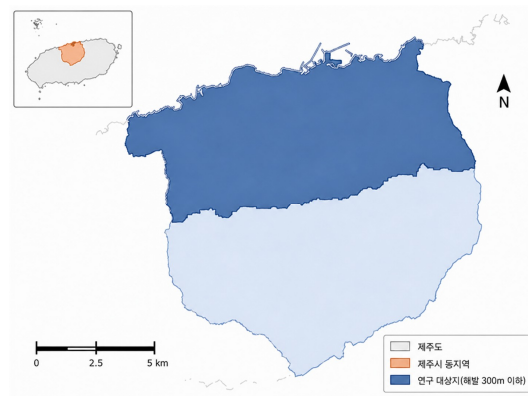
III. 분석 방법 및 자료

1. 연구 대상지

제주도는 한라산을 중심으로 고도가 증가하는 화산섬 지형을 가지며, 해안 저지대와 중산간 및 고지대가 비교적 뚜렷하게 구분된다. 본 연구의 공간적 범위는 제주도 전체 행정구역 중 읍·면 지역을 제외한 제주 시내 행정동 지역, 즉 제주도 동지역으로 설정하였다. 제주도 동지역 전체를 분석 대상으로 설정할 경우, 남측의 한라산 방향 중산간 및 고지대가 포함되어 고도 차이에 따른 LST 변화가 분석 결과에 크게 반영될 수 있다. 이 경우 해안 저지대 내부에서 나타나는 토지피복 구성에 따른 LST 차이를 해석하는 데 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 제주도 동지역 행정경계를 기본 연구 범위로 설정하되, 수치표고모델(DEM)을 활용하여 해발 300m 이하 지역만을 최종 연구 대상으로 추출하였다.

해발 300m 이하 지역은 제주도 동지역 내에서 해안 저지대와 도시적 토지이용이 주로 나타나는 공간으로, 시가화지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지 등이 함께 분포한다. 따라서 이 지역은 한라산 방향 고지대의 영향을 줄이면서, 지형 조건과 토지피복 구성에 따른 평균 LST 차이를 분석하기에 적합하다. 또한 본 연구는 육지 영역을 중심으로 분석하였으며, 해양 영역은 LST 산출 및 격자별 통계 분석에서 제외하였다(〈그림 1〉 참조).

그림 1 연구 대상지



2. 분석방법

본 연구에서는 Landsat Collection 2 Level-1 자료를 이용하여 2015~2021년 중 7개 가을철 사레일의 LST 자료를 구축하였다. 분석에 사용한 사레일은 2015년 10월 17일, 2016년 11월 4일, 2017년 10월 22일, 2018년 10월 25일, 2019년 11월 29일, 2020년 10월 14일, 2021년 10월 17일이다(〈표 2〉 참조). 이들 사레일은 계절적 차이에 따른 LST 변동을 줄이기 위해 10월과 11월 영상을 중심으로 선정하였으며, 연구 대상지 내 구름 및 결측 영역이 비교적 적고 유효 픽셀이 충분히 확보되는 날짜로 선정하였다. 전체 분석 절차는 〈그림 2〉와 같다.

LST 자료는 최종 연구 대상지 경계에 맞추어 마스크하였으며, 해양 영역과 결측값은 분석에서 제외하였다. 이후 연구 대상지에 대해 500m×500m 정방형 격자를 생성하고, 격자 중심점이 연구 대상지 내부에 위치한 격자를 분석 단위로 사용하였다. 각 격자에 대해서는 7개 사레일별 평균 LST와 유효 픽셀 수를 산출하였으며, 경계부 격자나 결측값의 영향을 줄이

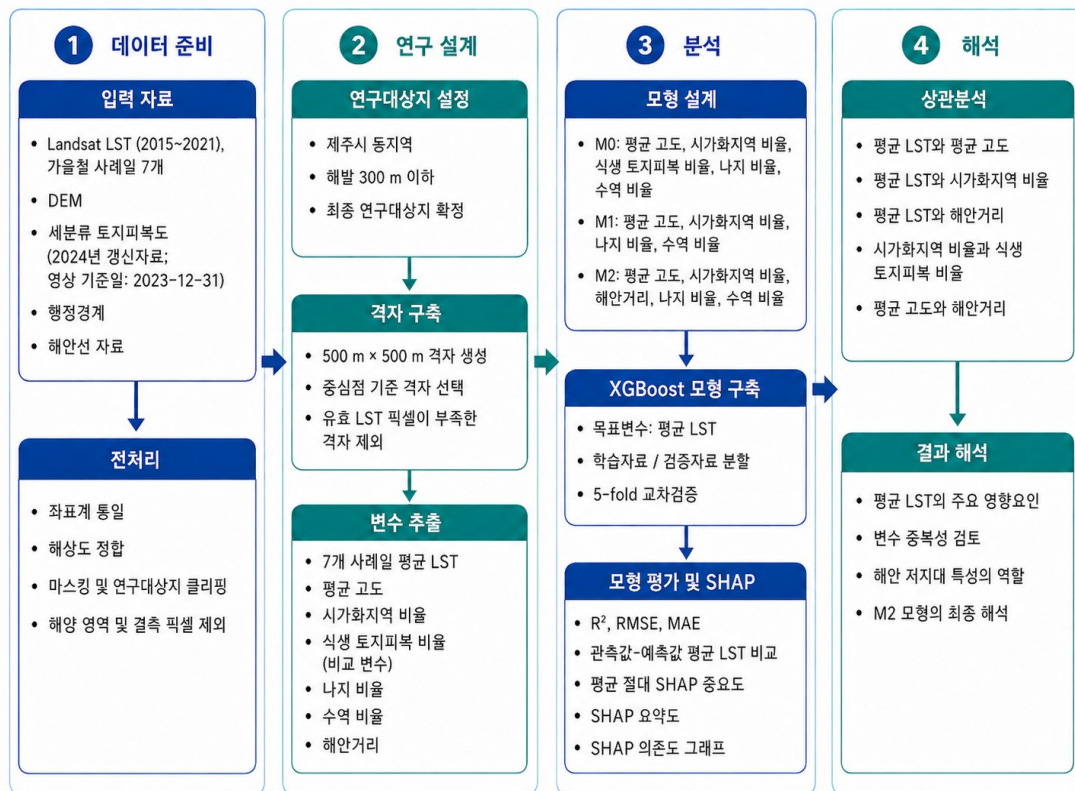
기 위해 유효 픽셀 수를 함께 검토하였다. 이후 7개 사레일의 LST 값을 종합하여 평균 LST를 산출하고, 이를 XGBoost 회귀모형의 목표변수로 활용하였다. 이때 평균 LST는 2015~2021년의 연속적인 시계열 변화를 의미하는 것이 아니라, 동일한 연구 대상지와 격자 체계에서 여러 가을철 사레일에 반복적으로 나타나는 상대적인 LST 공간 분포를 대표하는 값으로 설정하였다.

지형 요인은 수치표고모델(DEM)을 이용하여 500m 격자별 평균 고도로 산출하였다. 토지피복 요인은 환경부 세분류 토지피복도를 기반으로 구축하였으며, 본 연구에서 활용한 자료는 2024년 갱신자료로 속성 정보상 영상 기준일은 2023년 12월 31일로 확인된다. 세분류 토지피복도는 시가지지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지, 수역 등으로 재분류하였고, 각 격자 내 토지피복 유형별 면적 비율을 산출하였다. 또한 농업지역, 산림지역, 초지 비율을 합산하여 식생 토지 피복 비율을 생성하였으며, 수역 비율은 해양 영역을 제외한 연구 대상지 내부의 수역을 대상으로 산출하였다.

표 2 분석자료의 구성 및 출처

자료	시기 및 세부 내용	공간해상도	자료 출처
Landsat 8 Collection 2 Level-1 영상	2015-10-17, 구름양: 1.18%	TIRS 원자료 100m, 제공자료 30m 재배열 / LST 산출 후 500m 격자 단위 평균값 구축	USGS EarthExplorer
	2016-11-04, 구름양: 6.03%		
	2017-10-22, 구름양: 9.03%		
	2018-10-25, 구름양: 0.05%		
	2019-11-29, 구름양: 3.51%		
	2020-10-14, 구름양: 0.02%		
	2021-10-17, 구름양: 0.40%		
수치표고모델 (DEM)	제주시 동지역의 해발 300m 이하 지역 추출 및 500m 격자별 평균 고도 산출에 활용	원자료 해상도 기준 / 500m 격자 단위 평균값 산출	공간정보 오픈플랫폼 (V-world)
세분류 토지피복도	2024년 갱신자료(영상 기준일: 2023-12-31)를 활용하여 시가지지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지, 수역 등으로 재분류하고 500m 격자별 토지피복 비율 산출	세분류 토지피복도 기준 / 벡터 또는 래스터	환경부 환경공간정보서비스
행정경계	제주시 동지역 행정경계 설정 및 연구 대상지 마스크에 활용	벡터	공간정보 오픈플랫폼 (V-world)
해안선	500m 격자 중심점에서 제주도 분석 해안선까지의 최단거리 산출	벡터	공간정보 오픈플랫폼 (V-world)

그림 2 연구 흐름도



제주 해안 저지대의 공간적 특성을 반영하기 위해 해안거리 변수를 추가로 구축하였다. 해안거리 변수는 500m 격자의 중심점에서 가장 가까운 제주도 본섬 해안선까지의 최단거리로 정의하였다. 이를 위해 해안선 자료와 500m 격자 자료를 동일한 투영좌표계로 변환한 후, 각 격자 중심점과 해안선 사이의 최단거리를 미터 단위로 산출하였다.

XGBoost 회귀모형은 500m 격자 단위의 평균 LST와 지형·토지피복 및 해안거리 변수 간의 관계를 분석하기 위해 구축하였다. 입력변수 구성에 따른 예측 성능과 변수 중복성 문제를 검토하기 위해 세 가지 모형을 비교하였다. 기존 모형(M0)은 평균 고도, 시가화지역 비율, 식생 토지피복 비율, 나지 비율, 수역 비율로 구성하였다. 대안 모형(M1)은 시가화지역 비

율과 식생 토지피복 비율 간의 높은 음의 상관관계를 고려하여 식생 토지피복 비율을 제외한 모형으로 설정하였다. 보완 모형(M2)은 M1에 해안거리 변수를 추가한 모형으로, 평균 고도, 시가화지역 비율, 해안거리, 나지 비율, 수역 비율을 입력변수로 사용하였다.

구축된 500m 격자 자료는 학습자료와 검증자료로 분할하여 모형 학습과 성능 평가에 활용하였다. 전체 487개 격자 중 80%는 학습자료, 20%는 검증자료로 사용하였으며, 단일 분할 결과의 안정성을 확인하기 위해 5-fold 교차검증을 추가로 수행하였다. 모형 성능은 결정계수(R^2), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대오차(MAE)를 이용하여 평가하였다. 모형 성능 비교 결과와 변수 구성의 적절성을 함께 고려하여, 본 연구에서는 해안거리 변수를 포함한 M2 모형을 최종

보완모형으로 설정하였다.

XGBoost 모형의 예측 결과를 해석하기 위해 SHAP 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 최종 보완모형인 M2를 대상으로 평균 절대 SHAP 값을 산출하여 변수별 상대적 중요도를 비교하였으며, SHAP 요약 플롯과 의존성 플롯을 통해 각 변수가 평균 LST 예측값을 증가 또는 감소시키는 방향으로 작용하는지를 검토하였다. 마지막으로 XGBoost-SHAP 분석 결과를 보조적으로 확인하고 입력변수 간 중복성 여부를 검토하기 위해 평균 LST와 주요 변수 간 상관분석을 수행하였다.

IV. 분석 결과

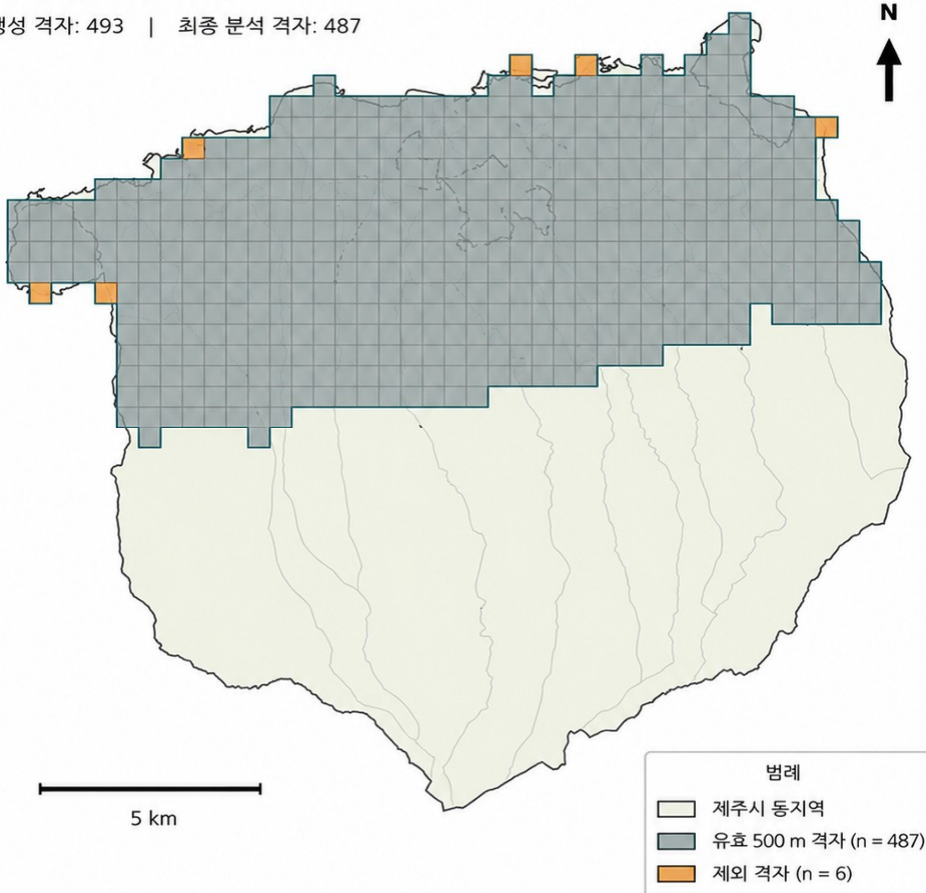
1. 500m 격자 기반 구축 결과

최종 연구 대상지 내에는 총 493개의 500m 격자가 생성되었으며, 이 중 유효 LST 픽셀 수가 부족한 6개 격자를 제외하고 487개 격자를 최종 분석에 활용하였다. 이는 전체 생성 격자의 약 98.8%에 해당한다. 제외된 격자는 주로 해안부 또는 연구 대상지 경계부에 위치하였다(〈그림 3〉 참조).

그림 3 제주시 동지역 300m 이하 지역의 500m 격자 분포

500 m 격자 구축

생성 격자: 493 | 최종 분석 격자: 487



500m 격자 기반 주요 변수의 기술통계량은 <표 3>과 같다. 7개 사례일 평균 LST는 약 11.17~18.61℃의 범위로 나타났으며, 전체 평균은 약 15.08℃로 산출되었다. 평균 고도는 약 4.73~293.66m 범위였고, 전체 평균은 약 125.22m로 나타났다. 토지피복 변수의 경우, 전체 487개 격자 평균 기준 시가화지역 비율은 약 32.06%, 식생 토지피복 비율은 약 62.67%로 산출되었다. 나지 비율과 수역 비율은 각각 평균 4.25%, 0.11%로 나타났으며, 해안거리는 약 11.50~7,140.15m의 범위를 보이고 평균은 약 3,342.33m로 산출되었다.

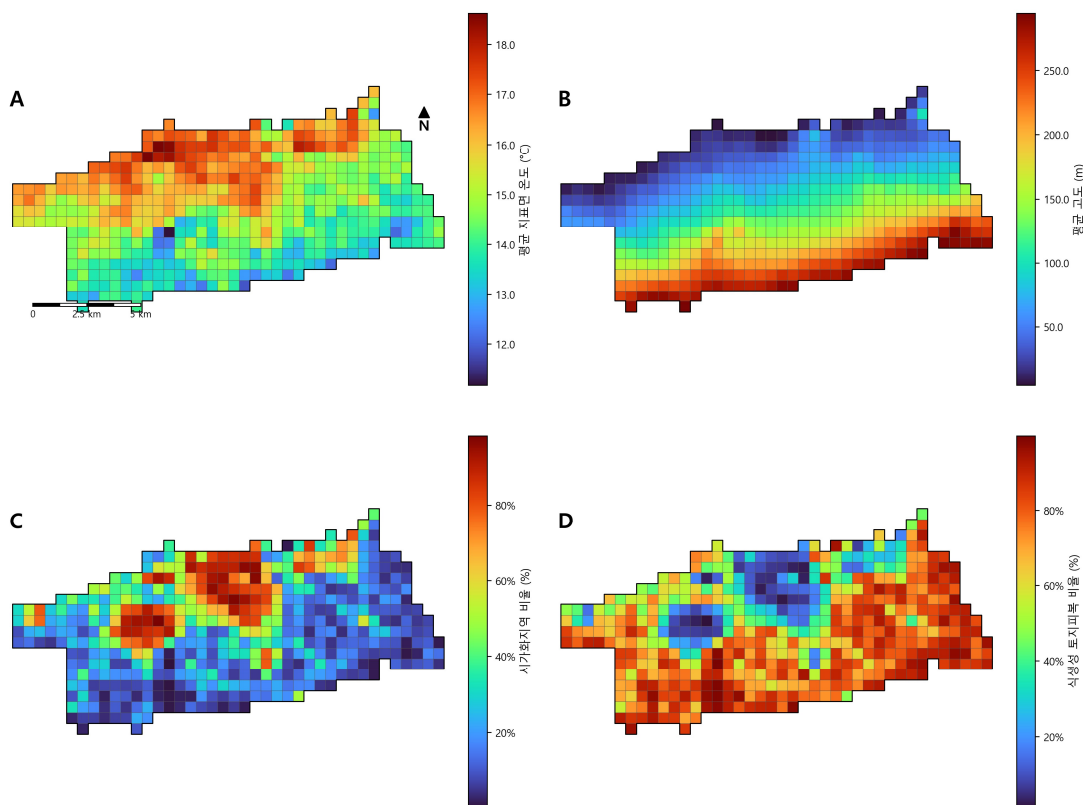
<그림 4>는 평균 LST, 평균 고도, 시가화지역 비율, 식생 토지피복 비율의 공간 분포를 보여준다. 평균 LST는 연구 대상지 북부 및 중심부의 시가화지역 비

표 3 500m 격자 기반 주요 변수의 통계량

변수	단위	평균	표준편차	최소값	최대값
평균 LST	℃	15.08	1.41	11.17	18.61
평균 고도	m	125.22	83.44	4.73	293.66
시가화지역 비율	%	32.06	27.61	0.24	98.33
식생 토지피복 비율	%	62.67	27.17	1.28	99.76
나지 비율	%	4.25	3.99	0.00	41.77
수역 비율	%	0.11	0.53	0.00	6.55
해안거리	m	3,342.33	2,019.07	11.50	7,140.15

율이 높은 격자에서 상대적으로 높게 나타났고, 남측 및 외곽부의 평균 고도가 높거나 식생 토지피복 비율이 높은 격자에서는 낮은 값을 보이는 경향이 확인되었다.

그림 4 500m 격자 기반 평균 LST 및 주요 지형·토지피복 변수의 공간 분포
(A: 평균 지표면 온도, B: 평균 고도, C: 시가화지역 비율, D: 식생 토지피복 비율)



2. XGBoost 기반 평균 LST 예측모형 성능 평가

500m 격자 단위 평균 LST를 목표변수로 하여 XGBoost 회귀모형을 구축하고, 모형별 예측 성능을 비교하였다. 전체 487개 격자 중 389개는 학습자료, 98개는 검증자료로 활용하였다. 모형별 성능 평가 결과는 <표 4>와 같다.

기존 모형(M0)은 검증자료에서 $R^2=0.839$, $RMSE=0.582^{\circ}C$, $MAE=0.419^{\circ}C$ 로 나타났으며, 5-fold 교차검증 결과 $R^2=0.849$, $RMSE=0.545^{\circ}C$, $MAE=0.409^{\circ}C$ 로 산출되었다. 식생 토지피복 비율을 제외한 M1 모형은 검증자료에서 $R^2=0.838$, $RMSE=0.585^{\circ}C$, $MAE=0.428^{\circ}C$ 로 나타나 M0과 유사한 예측 성능을 보였다. 이는 식생 토지피복 비율을 제외하더라도 평

균 LST의 공간적 차이를 예측하는 성능이 크게 저하되지 않았음을 의미한다.

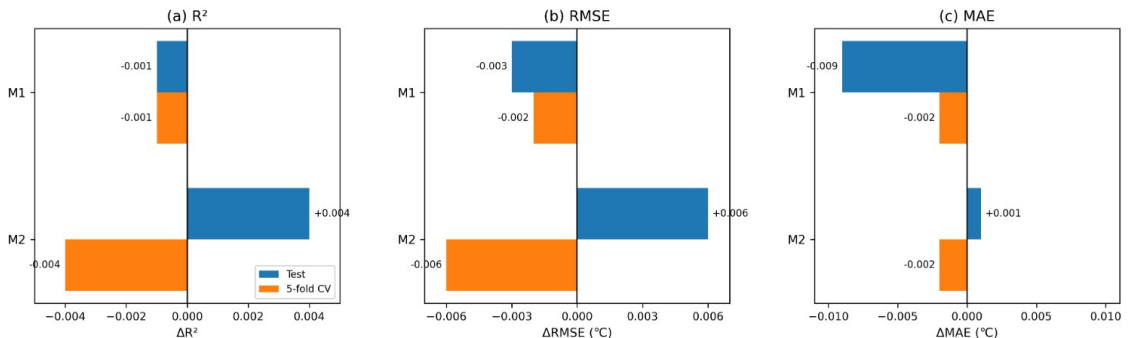
해안거리 변수를 추가한 M2 모형은 검증자료에서 $R^2=0.843$, $RMSE=0.576^{\circ}C$, $MAE=0.418^{\circ}C$ 로 나타나 검증자료 기준 가장 낮은 RMSE와 MAE를 보였다. 또한 5-fold 교차검증 결과도 $R^2=0.845$, $RMSE=0.551^{\circ}C$, $MAE=0.411^{\circ}C$ 로 나타나 단일 학습·검증 분할 결과와 유사한 수준을 보였다.

<그림 5>에서 양(+)의 값은 M0 대비 예측 성능이 개선되었음을 의미한다. M1은 M0와 비교하여 전반적으로 뚜렷한 성능 개선을 보이지 않았으며, 일부 지표에서는 성능이 소폭 저하되었다. 반면 M2는 검증자료 기준으로 R^2 가 증가하고 RMSE 및 MAE가 감소하여 예측 성능이 일부 개선된 것으로 나타났다.

표 4 XGBoost 회귀모형의 예측 성능 비교

모형	입력변수	평가자료	자료 수	R^2	RMSE ($^{\circ}C$)	MAE ($^{\circ}C$)
M0	평균 고도, 시가화지역 비율, 식생 토지피복 비율, 나지 비율, 수역 비율	학습자료	389	0.955	0.295	0.222
		검증자료	98	0.839	0.582	0.419
		5-fold 교차검증	487	0.849	0.545	0.409
M1	평균 고도, 시가화지역 비율, 나지 비율, 수역 비율	학습자료	389	0.954	0.301	0.228
		검증자료	98	0.838	0.585	0.428
		5-fold 교차검증	487	0.848	0.547	0.411
M2	평균 고도, 시가화지역 비율, 해안거리, 나지 비율, 수역 비율	학습자료	389	0.958	0.285	0.218
		검증자료	98	0.843	0.576	0.418
		5-fold 교차검증	487	0.845	0.551	0.411

그림 5 기존 모형(M0) 대비 대안 모형(M1)과 보완 모형(M2)의 예측 성능 변화



다만 5-fold 교차검증에서는 M0와 유사하거나 일부 지표에서 다소 낮은 성능을 보여, M2는 예측 성능을 크게 저하시키지 않으면서 해안거리 변수를 반영한 보완모형으로 해석할 수 있다.

최종 보완모형인 M2의 검증자료 관측값과 예측값을 비교한 결과, 대부분의 격자는 1:1 기준선 주변에 분포하여 M2 모형의 예측값이 실제 평균 LST의 공간적 변동을 대체로 반영하는 것으로 확인되었다(그림 6) 참조).

그림 6 XGBoost 보완모형(M2)의 평균 LST 관측값과 예측값 비교

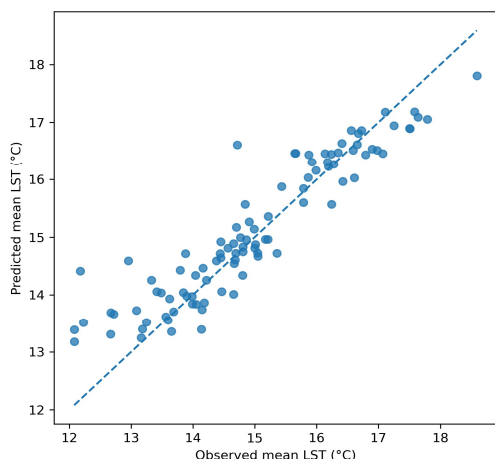
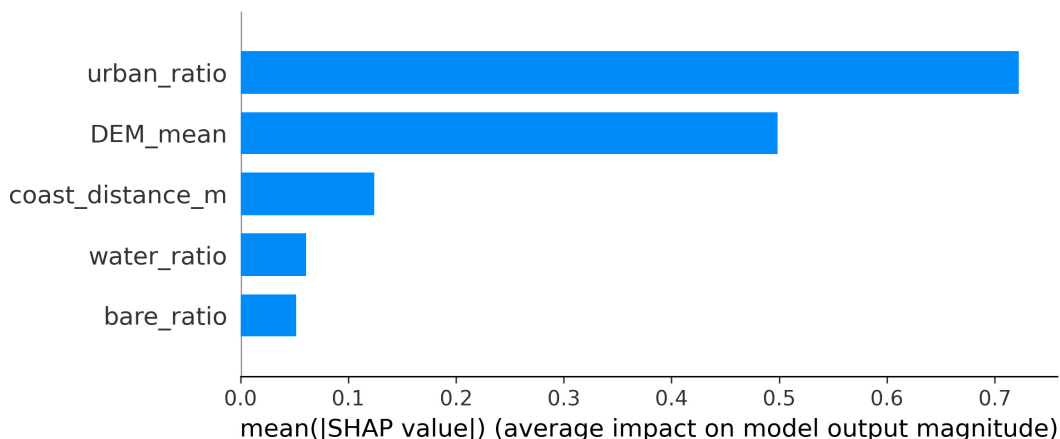


그림 7 XGBoost 보완모형(M2)의 평균 절대 SHAP 값 기반 변수 중요도



3. SHAP 기반 변수 중요도 및 방향성 분석

최종 보완모형인 M2를 대상으로 SHAP 분석을 수행한 결과, 평균 절대 SHAP 값은 시가화지역 비율에서 0.722로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 평균 고도 0.498, 해안거리 0.124 순으로 나타났다(그림 7) 참조). 수역 비율과 나지 비율의 평균 절대 SHAP 값은 각각 0.061과 0.052로 상대적으로 낮았다. 이는 M2 모형에서 평균 LST 예측에 가장 크게 기여한 변수는 시가화지역 비율이며, 평균 고도 역시 주요 변수로 작용하였음을 보여준다. 해안거리는 시가화지역 비율과 평균 고도에 비해 상대적 기여도는 낮았으나, 제주도 해안 저지대의 해안-내륙 방향 공간 특성을 보완적으로 설명하는 변수로 확인되었다.

〈그림 8〉을 살펴보면, 시가화지역 비율은 변수값이 높을수록 양의 SHAP 값을 보여 평균 LST 예측값을 증가시키는 방향으로 작용하였다. 반면 평균 고도는 값이 높을수록 음의 SHAP 값을 보여 평균 LST 예측값을 낮추는 방향으로 작용하였다. 이는 시가화지역 비율이 높은 격자에서 평균 LST가 상대적으로 높고, 평균 고도가 높은 격자에서 평균 LST가 상대적으로 낮게 나타나는 공간적 경향과 일치한다.

SHAP 의존성 플롯에서도 주요 변수의 방향성이 확인되었다(그림 9) 참조). 시가화지역 비율은 증가할수록 SHAP 값이 양의 방향으로 커지는 경향을 보였고, 평균 고도는 증가할수록 SHAP 값이 음의 방향으로 낮아지는 경향을 보였다. 해안거리는 일부 구간에서 평균 LST 예측값을 낮추는 방향으로 작용하였으나, 그 변화 양상은 단순한 선형 관계로 나타나지는 않았다. 이는 해안거리가 평균 고도 및 시가화지역 분포와 함께 변화하는 제주도 해안 저지대의 공간 구조를 반영한 결과로 해석된다. 따라서 해안거리는 평균 고도와 독립적으로 작용하는 단일 영향 변수라기

보다, 해안에서 내륙으로 이어지는 지형적·공간적 특성을 나타내는 보완적 설명변수로 이해하는 것이 적절하다.

4. 상관분석을 통한 변수 관계 분석

500m 격자별 평균 LST와 주요 변수 간의 상관분석 결과는 표 5와 같다. 평균 LST와 가장 강한 음의 상관관계를 보인 변수는 식생 토지피복 비율로, 상관계수는 -0.805로 나타났다. 평균 고도와 해안거리 역시 평균 LST와 각각 -0.803, -0.789의 음의 상관관계를

그림 8 M2 보완모형의 SHAP summary plot

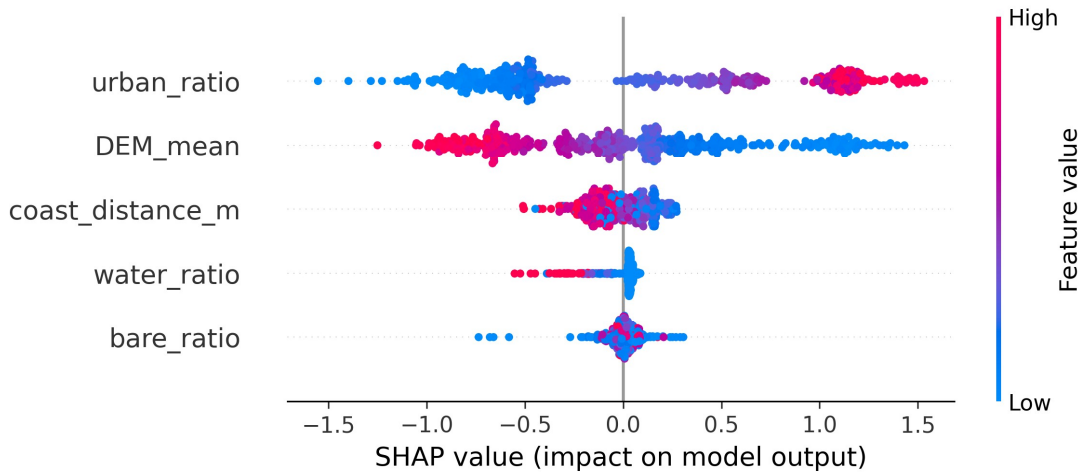


그림 9 M2 보완모형의 주요 변수별 SHAP 의존성 플롯

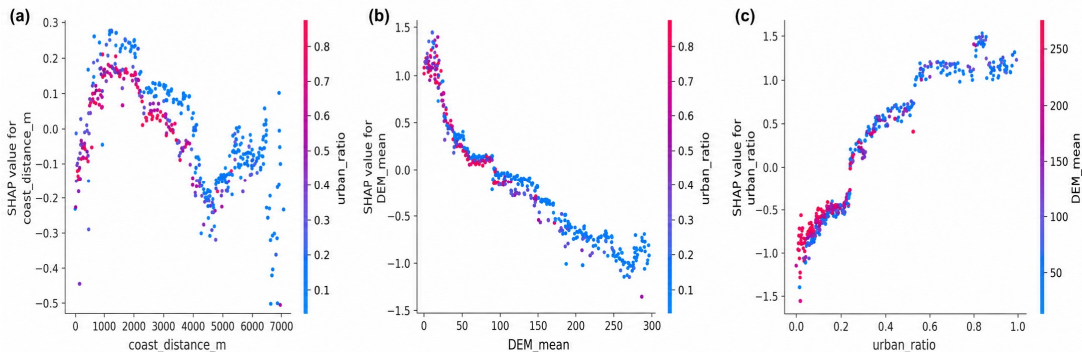


표 5 평균 LST 및 주요 변수 간 상관계수

구분	변수 1	변수 2	상관계수
평균 LST와 주요 변수 간 관계	평균 LST	시가화지역 비율	0.800
		식생 토지피복 비율	-0.805
		평균 고도	-0.803
		해안거리	-0.789
		나지 비율	-0.079
		수역 비율	0.093
입력변수 간 관계	시가화지역 비율	식생 토지피복 비율	-0.987
	평균 고도	해안거리	0.974
	시가화지역 비율	해안거리	-0.544
	평균 고도	시가화지역 비율	-0.554
	평균 고도	식생 토지피복 비율	0.568
	식생 토지피복 비율	해안거리	0.555

보였다. 반면 시가화지역 비율은 평균 LST와 0.800의 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 이는 시가화지역 비율이 높은 격자에서 평균 LST가 높고, 평균 고도와 식생 토지피복 비율이 높거나 해안으로부터 상대적으로 멀리 위치한 격자에서 평균 LST가 낮게 나타나는 경향을 보여준다.

입력변수 간 상관관계를 검토한 결과, 시가화지역 비율과 식생 토지피복 비율의 상관계수는 -0.987로 나타나 매우 높은 음의 상관관계를 보였다. 이는 두 변수를 동시에 핵심 설명변수로 투입하고 각각의 독립적 기여로 해석하는 데 한계가 있음을 의미한다. 이러한 결과를 반영하여 본 연구에서는 최종 보완모형인 M2에서 식생 토지피복 비율을 제외하고, 시가화지역 비율을 도시화 정도를 나타내는 대표 토지피복 변수로 활용하였다.

또한 평균 고도와 해안거리의 상관계수는 0.974로 매우 높게 나타났다. 이는 제주도 동지역 해안 저지대가 해안에서 한라산 방향으로 이어지는 지형 구조를 가지며, 해안으로부터 멀어질수록 평균 고도가 증가하는 공간적 특성이 반영된 결과로 해석된다. 따라서 해안거리는 평균 고도와 완전히 독립적인 변수라기

보다, 제주도 해안 저지대의 해안-내륙 공간 구배를 나타내는 보완적 설명변수로 이해할 필요가 있다. 한편 나지 비율과 수역 비율은 평균 LST와 각각 -0.079, 0.093의 낮은 상관관계를 보여, SHAP 분석에서 상대적으로 낮은 중요도를 보인 결과와 대체로 일치하였다.

V. 결론

본 연구는 제주도 동지역 중 해발 300m 이하 해안 저지대를 대상으로 Landsat 기반 LST를 500m 격자 단위로 집계하고, 평균 LST와 지형·도시공간 특성의 관계를 분석하였다. 연구 대상지는 해안과 인접한 도시지역, 농업지역, 초지 및 산림이 함께 분포하고, 해안에서 한라산 방향으로 고도 변화가 나타나는 공간이다. 따라서 본 연구는 제주도 전역을 단일한 분석 범위로 다루기보다, 도시적 토지이용과 해안 저지대 특성이 함께 나타나는 공간으로 연구 범위를 구체화하였다는 점에서 의의가 있다.

분석 결과, 제주도 해안 저지대의 평균 LST는 공간적으로 균질하지 않았으며, 시가화지역이 밀집한 북부 및 중심부 격자에서 상대적으로 높게 나타났다.

반면 평균 고도가 높거나 식생 토지피복 비율이 높은 남측 및 외곽부에서는 낮은 경향을 보였다. 이는 제주시 해안 저지대의 열환경이 단순한 토지피복 구성만이 아니라, 저지대 내부의 고도 차이, 시가화지역의 분포, 해안-내륙 방향의 공간적 위치가 함께 작용하는 구조 속에서 이해될 필요가 있음을 보여준다. 또한 본 연구는 시가화지역 비율과 식생 토지피복 비율 간의 높은 상관관계를 고려하여 입력변수 구성을 보완하고, 해안거리 변수를 추가함으로써 제주시 해안 저지대의 공간적 특성을 분석에 반영하고자 하였다.

본 연구 결과는 제주시 해안 저지대의 열환경 관리에서 시가화지역의 분포, 저지대 내부의 고도 차이, 해안으로부터의 거리와 같은 공간적 조건을 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다. 특히 시가화지역 비율이 높은 공간에서는 불투수면 확대를 최소화하고, 가로녹지, 공원, 완충녹지 등 식생 기반의 열완화 요소를 우선적으로 확보할 필요가 있다. 또한 해안 저지대에서는 도시지역 내부의 녹지 확보뿐만 아니라 주변 식생·농업지역과의 공간적 연결성을 유지하는 방향의 토지이용 관리가 요구된다.

다만 본 연구는 2015~2021년 중 7개 가을철 사례일의 평균 LST를 활용하였기 때문에 계절별 변화나 장기적인 시계열 변동을 직접적으로 설명하는 데에는 한계가 있다. 또한 LST 관측 기간과 세분류 토지피복도 기준시점 사이에 시간적 차이가 존재하므로, 본 연구 결과는 토지피복 변화에 따른 인과관계라기보다 평균 LST와 지형·도시공간 특성 간의 공간적 관련성으로 해석할 필요가 있다. 향후 연구에서는 연도별 토지피복 자료, NDVI, NDBI, 불투수면 자료, 건물 밀도, 건폐율, 용적률, 기상자료 등을 추가하여 제주시 해안 저지대의 열환경 특성을 보다 세밀하게 분석할 필요가 있다.

• 참고문헌

References

- 권혁춘, 이병걸. 2009. Landsat TM 영상을 이용한 제주도 도심지역 지표면온도 분포와 식생지수의 상관성 분석. *대한공간정보학회지* 17권, 4호: 39-44.
Kwon Hyuk-Chun and Lee Byung-Gul. 2009. Analysis of relationship between land surface temperature and NDVI using Landsat TM images on the city areas of Jeju Island. *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science* 17, no.4: 39-44.
- 서희철, 전승중, 윤진일. 2008. 제주도 초지피복 기생화산("오름")의 방위별 일 최고기온 분포. *한국농림기상학회지* 10권, 1호: 25-31.
Seo Hee-Chul, Jeon Seung-Jong and Yun Jin-I. 2008. Azimuthal distribution of daily maximum temperatures observed at sideslopes of a grass-covered inactive parasitic volcano ("Oreum") in Jeju Island. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 10, no.1: 25-31.
- 이정현, 윤성효. 2012. 제주도에 분포하는 제4기 단성화산체의 형태적 분류 및 분포 특성 연구. *암석학회지* 21권, 4호: 385-396.
Lee Jeong-Hyen, Yun Sung-Hyo. 2012. Study on the distributional characteristics and classification of quaternary monogenetic volcanoes in jeju island, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea* 21, no.4: 385-396.
- 이창호, 김현덕. 2024. 공간통계 기법을 이용한 서울시 지표면 온도 모델링: 온도와 인구변수 간의 공간적 분포를 고려한 회귀모형분석. *지적과 국토정보* 54권, 2호: 19-32.
Lee Chang-Ho, Kim Hyeon-Deok. 2024. Modeling Land Surface Temperature Using Spatial Statistical Methods: A Regression Modelling Approach to Analyzing Spatial Patterns Between Temperature and Demographic Data in Seoul, South Korea. *Journal of Cadastre & Land Information* ,54 no.2: 19-32.
- Husain, M. A., Kumar, P. and Gonencgil, B. 2023. Assessment of spatio-temporal land use/cover change and its effect on land surface temperature in Lahaul and Spiti, India. *Land* 12, no.7: 1294.

6. Jeong Hogeong, Shin Yeeun and An Kyungiin. 2025. City-specific drivers of land surface temperature in three Korean megacities: XGBoost-SHAP and GWR highlight building density. *Land* 14, no.11: 2232.
7. Kim Minjun, Kim Dongbeom and Kim Geunhan. 2022. Examining the Relationship between Land Use/Land Cover (LULC) and Land Surface Temperature (LST) Using Explainable Artificial Intelligence (XAI) Models: A case study of Seoul, South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19, no.23: 15926.
8. Muhammad Farhan Ul Moazzam, Doh Yang-Hoi and Lee Byung-Gul. 2022. Impact of urbanization on land surface temperature and surface urban heat Island using optical remote sensing data: A case study of Jeju Island, Republic of Korea. *Building and Environment* 222: 109368.
9. Muhammad Farhan Ul Moazzam and Lee Byung-Gul. 2023. Elevation-wise and direction-wise distribution of land surface temperature in Jeju Island using Landsat 7 data. *International Journal of Geoinformatics* 19, no.9: 13-20.
10. Njoku, E. A. and Tenenbaum, D. E. 2022. Quantitative assessment of the relationship between land use/land cover (LULC), topographic elevation and land surface temperature (LST) in Ilorin, Nigeria. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 27: 100780.
11. Pal, S. and Ziaul, S. K. 2017. Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 20, no.1: 125-145.
12. Wei, J., Li, Y., Jia, L., Liu, B. and Jiang, Y. 2025. The impact of spatiotemporal effect and relevant factors on the urban thermal environment through the XGBoost-SHAP model. *Land* 14, no.2: 394.
13. Yoon Seong-Uk, Ahn Jin-hyun, Kim Yoon-Seok, Han Gyung-Deok, Chung Yong-Suk and Lee Seung-Jae. 2022. Monitoring temperature Variation in Rising Small Defunct Volcano on Jeju Island, Republic of Korea, Using High-Resolution Sentinel-2 Images. *Atmosphere* 13, no.4: 576.

-
- 논문 접수일: 2026. 3. 31.
 - 심사 시작일: 2026. 4. 27.
 - 심사 완료일: 2026. 6. 22.

요약

본 연구는 Landsat 기반 지표면 온도(LST) 자료와 XGBoost-SHAP 기법을 활용하여 제주도 동지역 중 해발 300m 이하 해안 저지대의 평균 LST와 지형·도시공간 특성 간의 관계를 분석하였다. 2015~2021년 중 7개 가을철 사레일의 LST를 500m×500m 격자 단위로 집계하였으며, 유효 LST 픽셀 수가 부족한 격자를 제외한 487개 격자를 최종 분석에 활용하였다. 평균 LST는 11.17~18.61℃ 범위였고, 전체 평균은 15.08℃로 나타났다. 본 연구는 시가화지역 비율과 식생 토지피복 비율 간의 높은 음의 상관관계를 고려하여 기존 모형, 식생 제외 모형, 해안거리 추가 모형을 비교하였다. 최종 보완모형(M2)은 평균 고도, 시가화지역 비율, 해안거리, 나지 비율, 수역 비율을 입력변수로 사용하였으며, 검증자료에서 $R^2=0.843$, $RMSE=0.576^{\circ}C$, $MAE=0.418^{\circ}C$ 의 예측 성능을 보였다. SHAP 분석 결과, 평균 LST 예측에 가장 크게 기여한 변수는 시가화지역 비율이었고, 다음으로 평균 고도와 해안거리 순으로 나타났다. 시가화지역 비율은 평균 LST 예측값을 높이는 방향으로, 평균 고도는 낮추는 방향으로 작용하였다. 해안거리는 상대적 기여도는 낮았으나, 제주도 해안 저지대의 해안-내륙 공간 구배를 보완적으로 설명하는 변수로 확인되었다. 본 연구는 제주도 해안 저지대의 열환경 특성을 격자 단위로 검토하고, 도시지역 열환경 관리와 토지이용 계획을 위한 기초자료를 제시한다.

• **주제어:** 지표면 온도, XGBoost-SHAP, Landsat, 해안 저지대, 해안거리