

DEM을 활용한 해안사구 중단기 퇴적환경 변화 탐지: 신두리 해안사구를 중심으로*

정근비** · 서종철*** · 장동호****

Detection of Medium-Term Sedimentary Environment Changes in Coastal Dunes Using DEM: A Case Study of the Sinduri Coastal Dunes*

Geun-Bi Jeong** · Jong-Cheol Seo*** · Dong-Ho Jang****

요약 : 본 연구는 1999년과 2023년 사이의 신두리 해안사구 지형 변화를 정량적으로 평가하고자 DEM 기반 지형단면 분석을 수행하였다. 연구 결과, 해변, 전사구, 후사구를 포함한 총 9개의 단면선을 분석한 결과, 구간별로 뚜렷한 침·퇴적의 환경 변화가 나타났다. A~D 구간은 해변 침식과 전사구 퇴적이, E~H 구간은 두 지형 모두에서 강한 퇴적 경향이 확인되었다. 후사구는 A~D 구간에서 침식과 퇴적이 혼재되었고, E~H 구간에서는 전반적으로 후퇴하였으나 일부 고도 상승도 관찰되었다. 이러한 변화는 인공 구조물 설치, 사구 복원 정책이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 본 연구는 해안사구 관리를 위한 DEM 기반 장기 모니터링의 가치와, 자연적 요인과 인위적 영향을 함께 고려하는 통합 전략의 필요성을 제시한다.

주요어 : 해변, 해안사구, 디지털표고모델(DEM), 지형 분석, 풍성 작용

Abstract : This study quantitatively assessed the geomorphic changes of the Sinduri coastal dune system between 1999 and 2023 using cross-sectional analysis based on Digital Elevation Models (DEM). A total of nine cross-sections were analyzed across the beach, foredune, and backdune zones, revealing distinct spatial patterns of erosion and deposition across different sections. In sections A-D, beach erosion and foredune deposition were dominant, while sections E-H showed strong depositional trends in both zones. The backdune exhibited mixed erosion and deposition in sections A-D, and overall retreat in E-H, although localized elevation gains were also observed. These changes are interpreted as the combined effects of artificial structures and dune restoration efforts. This study highlights the value of long-term DEM-based monitoring for coastal dune management and emphasizes the need for integrated strategies that consider both natural processes and human-induced impacts.

Key Words : Beach, Coastal dune, Digital Elevation Model(DEM), Topographic analysis, Aeolian processes

I. 서론

전 세계적으로 기후 변화와 환경 파괴가 심화됨에 따

라, 자연 생태계의 보전과 복원에 기반한 지속가능한 해결책의 필요성이 더욱 커지고 있다. 기존의 인프라 중심 대응 방식은 고비용, 생태계 훼손, 단기적 효과에 그치는

*본 논문은 정근비의 2025년도 석사 학위논문의 데이터를 활용하여 재구성하였음.

**공주대학교 지리학과 박사과정(Doctor Student, Department of Geography, Kongju National University, jkb8996@smail.kongju.ac.kr)

***한국환경지리연구소 이사(Director, Korea Environmental Geography Research Institute, jcseo99@naver.com)

****공주대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Kongju National University, gisrs@kongju.ac.kr)

등 문제점을 안고 있다. 이에 따라 자연 혹은 자연 모방 시스템을 활용해 사회·환경 문제를 해결하는 자연기반 해법(Nature-based Solutions, NbS)이 주목받고 있다(Dunlop *et al.*, 2024).

숲, 습지, 해안사구 등 자연 생태계는 NbS 구현의 핵심 수단으로, 습지·해초초 보호 및 사구 복원과 같은 표적 생태 복구 활동이 기후 변화에 직면한 연안 생태계의 복원력을 높이는 효과적인 전략으로 활용되고 있다(Plan Bleu, 2025). 이러한 생태계는 연안 보호, 침식 통제, 해일 완화 등의 주요 서비스를 제공하는 한편, 탄소 흡수·저장, 재해 완화, 생태계 서비스 제공, 지역사회에 경제적·사회적 혜택을 창출하는 다차원적 기능을 수행한다.

이 가운데 해안사구(Coastal Dunes)는 NbS의 대표 사례로, 연안 지역의 기후 변화 대응과 재해 방지, 생물다양성 보전 측면에서 중요한 역할을 한다. 해안사구는 바다와 육지 사이 전이지대에 형성된 독특한 생태계로, 파랑, 폭풍해일, 해수면 상승으로부터 내륙을 보호하는 자연 방벽 역할을 수행한다(Borsje *et al.*, 2011). 또한 희귀하고 특화된 생물종의 서식지로 높은 생태적 가치를 지니며, 인공 구조물 대비 유지비용이 낮고 자가 복원력이 뛰어난 특성을 갖는다(Feagin *et al.*, 2015). 경관적·문화적 가치 측면에서도 지역 관광과 정체성 형성에 기여한다. 그러나 해안사구는 파도, 조류, 바람과 같은 자연적 요인뿐 아니라 도시화, 관광 개발, 기후변화 등 인위적 요인으로 인해 지속적인 변화와 영향을 받고 있다. 이러한 변화 양상을 정밀하게 파악하는 일은 해안사구 보전과 효과적인 관리 전략 수립에 필수적이다.

해안사구는 연안환경 변화에 민감하게 반응하는 역동적인 지형 요소로, 침·퇴적 양상과 지형 변화를 정량적으로 평가하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 2000년대 초반까지는 항공사진 해석과 현장 측량에 기반한 분석이 주를 이루었으며, 디지털 사진 측량기법을 활용한 단면 위치 추정(김민호, 2002; 김민호 등, 2002), 항공사진 기반 지표피복 변화 분석(서종철, 2002) 등이 신두리 해안사구를 중심으로 진행되었다.

이와 더불어, 서종철(2005)과 홍성찬 등(2010)은 지표 투과레이더(GPR)와 광여기루미네선스(OSL) 연대측정 기법을 적용하여 사구 퇴적층의 내부 구조와 수평 성장 방향을 추정하고, 퇴적물 공급량 변화와 기후변화의 연관성을 제시하였다. 특히 이들 연구는 사구 성장의 방향성뿐 아니라, 향후 해수면 상승에 따른 사구 지형의 민감

한 반응 가능성을 강조하며, 정밀한 연안 지형 관리의 중요성을 제기하였다.

또한, 김대현(2004)은 신두리 사구 지역의 퇴적물에 포함된 질산염 및 주요 양이온 농도 분포를 분석하여, 사구의 지화학적 특성이 단순한 거리 요인 외에도 식생 분포, 기상 조건 등 복합적 요인에 의해 영향을 받는다는 점을 밝혔다. 이는 사구의 변화 해석에 있어 물리적 지형 요인뿐 아니라 생태·화학적 맥락의 통합 분석이 필요함을 시사한다.

최근에는 UAV(무인항공기) 기반 3차원 포인트 클라우드 생성과 고해상도 시계열 영상 분석이 가능해지면서 보다 정밀한 지형 변화 탐지가 이루어지고 있다. 송영선(2021)은 드론 기반 공간정보 분석을 통해 신두리 해안사구의 지형 변화를 시계열적으로 분석하였고, 윤공현 등(2022)은 항공사진, UAV 영상, LiDAR 데이터를 통합하여 DEM 차분을 기반으로 침·퇴적량 산정과 불확실성 분석까지 수행하였다. 이와 같은 접근은 과거 단면 기반 추정에서 한 걸음 더 나아가, 시간적 변화량과 구조적 변화의 불확실성까지 포괄적으로 평가할 수 있게 하였다.

국내 타 지역에서도 RTK-GPS 측량(한충목·김용석, 2009), 지상기반 라이다(신대섭·서종철, 2011)를 활용한 정밀 지형 변화 분석이 시도되었으며, Duffy *et al.*(2018)은 Kite Aerial Photography와 SfM-MVS 기법을 결합하여 수십 cm 수준의 고도 변화를 정밀 탐지하였다. Burvingt and Castelle(2023)는 서유럽 해안을 대상으로 폭풍, 해수면 상승 등 기후 변화 요인이 수 시간부터 수십 년에 걸쳐 해안사구의 침·퇴적 과정에 미치는 영향을 다양한 시간 스케일에서 평가하였다.

이와 같이, 최근 해안사구 연구는 측량기술의 발전과 시계열 자료의 확보를 바탕으로 정밀도와 공간적 확장성을 크게 향상시켰으며, 복합적인 자연·인위 요인에 따른 지형 변화 분석이 가능해지고 있다. 그러나 여전히 장기 시계열 자료를 기반으로 한 정량적 분석은 제한적인 실정이며, 특히 구조적 변화와 환경적 요인의 상관관계를 단면 수준에서 체계적으로 검토한 사례는 부족한 실정이다.

본 연구는 이러한 최신 연구 동향을 반영하여, 과거와 현재의 다중 시기 DEM 자료를 활용한 정밀 비교 분석을 통해 해안사구 시스템 변화 양상과 원인을 규명하고자 한다. 특히 지형 단면 분석을 중심으로 고도 변화를 정량적·시각적으로 평가함으로써 복잡한 해안사구의 지형 변화 이해에 기여하고자 한다. 본 연구 결과는 해안사구 보전 및 관리 정책 수립, 해안 침식 대응 전략 개발, 기후변화 대응

및 연안 지역 취약성 평가에 중요한 정보를 제공할 것이다. 또한 기존 해안사구 변화 연구가 주로 단일 시기의 정성적 분석에 머물렀던 한계를 넘어, 24년간의 시계열 DEM 자료와 정밀 단면 분석을 결합하여 해안사구 시스템의 장기적 변화와 복원 가능성을 체계적으로 고찰하였다.

II. 연구지역 및 연구방법

1. 연구지역

본 연구의 대상지는 충청남도 태안군 원북면 신두리에 위치한 신두리 해안사구이다. 신두리 해안사구는 국내 최대 규모의 해안사구로서 사구 원형이 잘 보존되어 있으며, 사구 형성과 고환경 연구에 높은 학술적 가치를 지닌다. 이러한 가치를 인정받아 2001년 천연기념물 제431호로 지정되었다(문화재청, 2005).

천연기념물 지정구역은 해안선을 따라 길이 약 3.4km, 폭 0.5~1.3km 범위로 형성되어 있으며(그림 1-(B)), 신두리 해안 만입부의 사빈 배후를 따라 분포하고 있다. 이 지역은 겨울철 북서풍의 영향을 강하게 받는 위치에 있으며, 인접 해역이 주로 모래로 구성되어 있어 간조 시 노출

되는 넓은 사질갯벌과 해빈의 모래가 바람에 의해 육지로 이동하는 사구 형성에 유리한 조건을 갖추고 있다(국가유산 포털).

연구지역 설정은 기존 연구와의 비교 가능성과 자료 연속성 확보를 고려하여 선정하였으며, 두 시기의 측정 방식이 상이하여 식생으로 피복되어 있는 지역은 대상에서 제외하였다(그림 1-(A)). 본 연구에서는 서종철(2001)의 연구와 동일한 자료 및 공간 범위를 적용하였으며, 해당 지역은 사구의 원형이 잘 보존되어 있어 사구 지형 변형 분석에 적합한 사례 지역이다. 연구지역의 지리적 범위는 $36^{\circ} 50' 34.80'' \text{ N} \sim 36^{\circ} 51' 24.80'' \text{ N}$, $126^{\circ} 11' 29.20'' \text{ E} \sim 126^{\circ} 12' 14.05'' \text{ E}$ 이며, 면적은 $864,507 \text{ m}^2$ 이다.

신두리 해안사구의 지형적 특성을 살펴보면, 해안을 따라 사질갯벌, 해빈, 사구가 존재하고 그 배후 내륙에 풍화층이 노출된 기반암 산지가 존재한다(국가유산포털). 사구 지형은 전사구, 사구습지, 후사구 등 다양한 지형들이 발달되어 있으며, 사구 내부에는 바르한형 사구, 취식와지, 사구에 등 다양한 미지형이 형성되어 있다. 이러한 복합적 지형은 신두리 해안사구의 침·퇴적 및 사구 발달에 중요한 영향을 미친다.

지질적 특성으로는 연구지역과 주변이 주로 선캄브리아기 서산층군 이북리층과 신생대 제4기 충적층으로 구



그림 1. 연구지역도

성된다. 서산층군 이북리층은 주로 흑운모편암으로 이루어져 있으며, 일부 지역에는 철광석을 함유한 함철규암과 화강편마암이 관입되어 분포한다. 층적층은 저지대 및 수계 주변에 발달하며, 주로 모래와 펄로 구성되고 기반암의 풍화·침식 작용으로 형성된 풍화 잔적토가 두껍

게 퇴적되어 있다(한국동력자원연구소, 1982). 연구지역 대부분은 모래로 이루어진 층적층이 넓게 분포하며, 남동부 배후사구 지역은 서산층군 이북리층 기반암 위에 사구가 형성된 구조를 보인다.

기후 특성 분석을 위해 태안 AWS(Automatic Weather System)를 분석하였다(그림 2). 이는 연구지역과 가까운 기상관측망 중 기후평년값(1991~2020년, 30년 기준)을 알 수 있는 지역으로 선정하였다. 태안군의 연평균기온은 12.8°C이며, 최난월(8월) 평균기온 25.9°C, 최한월(1월) 평균기온 -0.5°C로 연교차는 26.4°C에 이른다. 연평균 강수량은 1,157.2mm이며, 이 중 약 45%가 여름철에 집중되어 계절별 강수 집중형 기후 특성을 보인다. 연평균 풍속은 1.9%로 계절 변화는 크지 않으나, 봄철(3~4월)에는 2.2%로 가장 높은 풍속이 나타난다(기상청).

또한, 연구지역의 계절별 풍향과 풍속을 살펴보기 위해

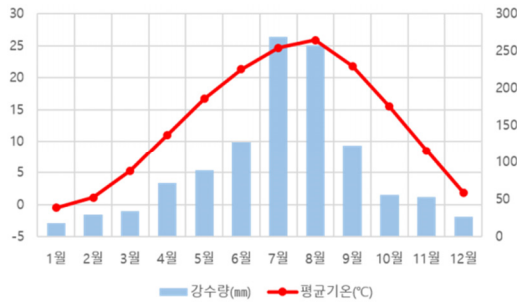
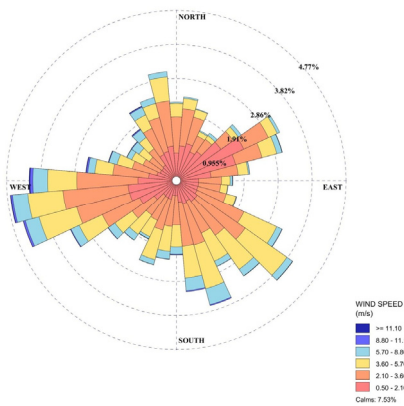
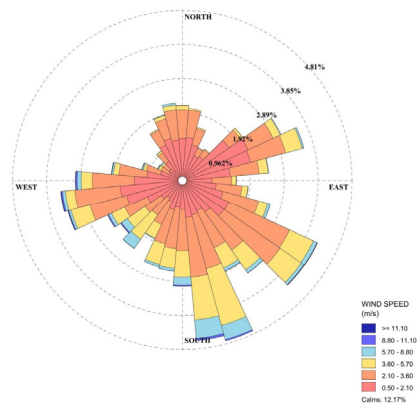


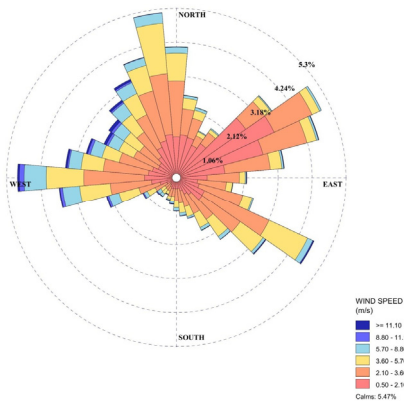
그림 2. 태안군 평년 기후(기상청, 태안 AWS)



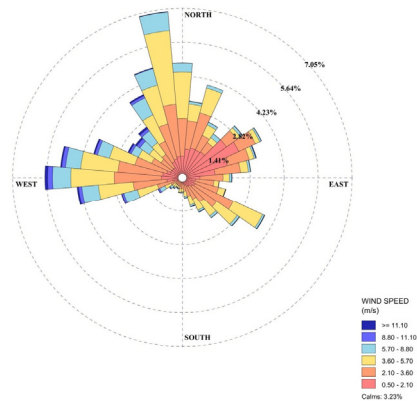
(a) 봄



(b) 여름



(c) 가을



(d) 겨울

그림 3. 2023년 만리포 AWS 바람장미(기상청)

가장 가까이에 위치한 만리포 AWS의 바람장미를 분석하였다(그림 3). 무풍 상태(0.5% 미만)는 여름철에 가장 높은 빈도로 나타났으며, 봄, 가을, 겨울철 순으로 그 비율이 감소하였다. 가을철에는 남풍계열을 제외한 거의 모든 방향에서 바람이 관측되었으며, 특히 서풍계열의 풍속이 8.0% 이상으로 강하게 나타나는 특징을 보였다. 겨울철은 가을철과 유사한 양상을 보이지만, 동풍의 비율은 감소하고 서풍의 발생 빈도와 강도가 더욱 높아졌다. 봄철에는 모든 방향에서 바람이 관측되었으며, 서풍계열의 풍향 빈도와 풍속이 가장 높은 것으로 나타나 계절 중 가장 다양하고 강한 바람 특징을 보였다. 여름철은 상대적으로 바람의 세기가 약하나, 주로 동풍 및 남서풍이 나타났으며, 이 중 남동풍의 출현 빈도가 가장 높았다. 전반적으로 여름에서 겨울로 갈수록 풍속이 강해지는 경향을 보였으며, 봄과 여름에는 다방향성 풍향 분포가, 가을과 겨울에는 북서풍계열의 강한 편향성이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 지형·지질·기후적 특성은 신두리 해안사구의 침·퇴적 과정과 사구 발달에 중요한 환경적 요인으로 작용하고 있으며, 본 연구에서는 이를 고려하여 사구 변화 분석을 수행하였다.

2. 연구방법 및 사용자료

1999년과 2023년 신두리 해안사구 지형 변화 분석을 위해 각 시기의 DEM(Digital Elevation Model, 수치표고

모형)을 구축하고, 사구의 중·횡단면 변화를 분석하였다(그림 4). 1999년 DEM 구축은 서종철(2001)의 광파측거기(Total Station) 점 자료를 기반으로 Kriging 보간법을 적용하여 생성하였다(그림 5-(a)). 2023년 DEM은 드론 영상과 RTK 데이터를 활용하여 구축하였으며, 결국 구간은 Kriging 기법으로 보완하였다(그림 5-(b)). 드론 영상 촬영과 동시에 RTK를 이용해 지상기준점(GCP)을 수집하여 정사영상과 고도 데이터의 정확도를 확보하였다. 계절별 지형 변화 특성을 반영하기 위해 2023년 촬영 시

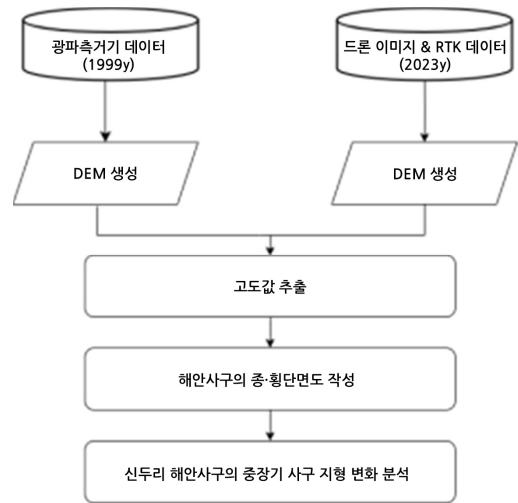
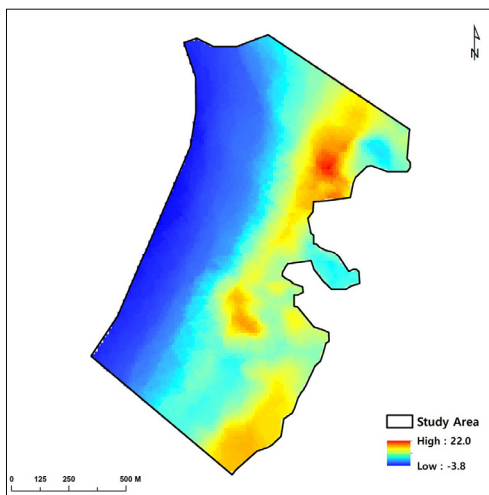
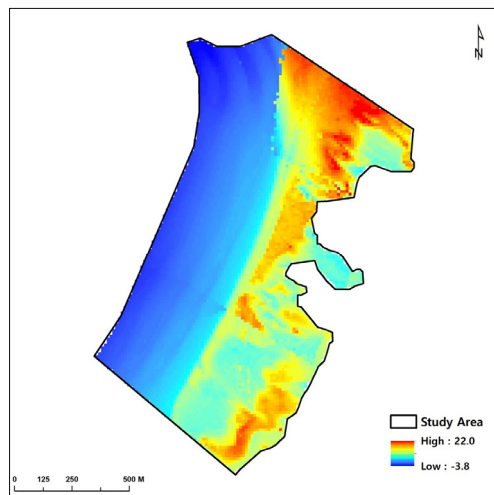


그림 4. 연구흐름도



(a) 1999년



(b) 2023년

그림 5. 연구지역 DEM



그림 6. 측선 위치도

기는 1999년과 동일한 시기에 설정하였다. 현장 조사에서 획득한 드론 이미지는 'Pix4D Mapper'를 사용하여 정사영상으로 제작하였다. 영상처리는 'Pix4D Mapper'에서 사전 접합(Initial Processing), 포인트 클라우드 생성(Point Cloud), 정사영상 추출(Orthomosaic), DEM(수치표면모형) 생성(Generate DEM) 단계로 진행하였다. 생성된 DEM은 해안사구를 종·횡으로 횡단하는 9개의 측선(A~H: 수직 8개, I: 수평 1개)을 따라 해안선에서 가까운 곳부터 단면도를 작성하여 분석에 활용하였다(그림 6).

드론 촬영에 사용된 기체는 Phantom 4 Pro V2(DJI, China)이며, 1회 비행 시 촬영 가능 범위는 1km^2 이내로 제한되어 비행계획 설정이 필요하였다. 비행계획은 'Pix4D Capture'(Pix4D, Switzerland) 애플리케이션을 이용해 구역당 종·횡 거리 최대 1km 이하로 설정하였고, 비행 고도는 100m 로 유지하였다. 촬영 시 종·횡 중복도는 일반 지역 70%, 산림 지역 85%로 설정하였으며, 기체 속도는 'fast', 카메라 각도는 연직방향(90°)으로 설정하였다.

본 연구 대상지인 태안 신두리 해안사구는 국립공원 내 비행금지구역에 해당하기 때문에, 드론을 이용한 항공사진 촬영 전 무인비행장치 비행 승인을 사전 획득한 후 조사를 수행하였다.

III. 해안사구 과거 침·퇴적 환경 변화 비교 분석

1. DEM 생성 및 검증

본 연구에서는 구축한 수치 표면 모형(DEM)의 수직 정확도를 평가하기 위해 DEM 범위 내에서 총 54개의 검증점을 활용하였다(그림 7). 검증점은 UAV 촬영 시 설정한 지상기준점(GCP)과 독립 검증용으로 확보한 고정밀 RTK-GNSS 측량 데이터를 기반으로 선정하였다. 또한, 사구 지형을 크게 사질갯벌 및 해변, 전사구, 후사구로 구분하여 검증점을 고르게 배치하였으며, 고도 변화가 뚜렷한 사구 정상부, 완사면, 저지대 등 다양한 지형 구간에도 배치하였다. 사구 북부와 남부 지역을 대표하는 측선을 따라 검증점을 확보하여 지형적 대표성을 고려하였다.

검증점의 관측 고도와 DEM에서 추출한 고도값을 비교하여 수직 정확도를 산출하였으며, 이를 위해 검증점 단위의 고도차를 계산하고 대표적인 통계 지표인 평균 절대 오차(MAE), 제공근 평균 오차(RMSE), 표준편차(STD)를 적용하였다. 평균 절대 오차는 오차 크기의 평균으로 DEM의 실제 오차 수준을 직관적으로 나타낸다. 제공근 평균 오차는 큰 오차에 더 민감하게 반응하는 대표적 정확도 지표이며, 표준편차는 오차 값이 평균 오차로부터 얼마나 분산되어 있는지를 보여주어 DEM의 일



그림 7. 검증점 위치도

관성을 판단하는 기준이 된다.

이러한 검증 지표를 종합적으로 활용함으로써 본 연구에서는 DEM의 전반적인 정확도뿐만 아니라 오차의 특성과 분포를 다각적으로 분석할 수 있었다. 또한 이러한 통계적 정확도 검증 방법(MAE, RMSE, STD)은 다양한 DEM 정확도 평가 연구에서 표준적으로 활용되어 왔으며, 드론 기반 DEM뿐만 아니라 위성 DEM의 품질 검증에도 적용되고 있다(Höhle and Höhle, 2009; Wessel et al., 2018).

검증 결과, 평균 절대 오차(MAE)는 0.332m로, DEM과 실제 측량값 간 평균 차이는 약 33cm 수준이다(표 1). 이는 복잡하고 미세한 지형 변화가 빈번한 해안사구 분석에서 실무적으로 충분히 수용 가능한 정확도에 해당한다. 특히 식생 피복과 사질 지반 특성으로 인해 정밀 고도 측정이 어려운 해안사구 특성을 고려할 때, 본 DEM의 MAE 수준은 고도 변화 추적 및 장기 모니터링 연구에 충분히 적용 가능하다.

평균 제곱근 오차(RMSE)는 0.518m로 나타났으며, 이는 일부 국지적 영역에서 상대적으로 큰 오차가 발생했음을 시사한다. 고오차 발생 구간은 주로 식생 밀집 지역, 급경사 구간, 그림자 영역 등에서 나타날 가능성이 높다. 그럼에도 불구하고 전체 정확도 수준은 UAV 기반 DEM에서 일반적으로 기대되는 범위인 $\pm 0.5 \sim 1.0$ m 내에 해당한다.

표준편차(STD)는 0.516m로, 오차 분포가 비교적 균일하게 유지됨을 확인하였다. 이는 국지적 왜곡이나 특정 영역의 오류 집중 현상 없이, 전체 DEM 영역에서 일관된 품질 수준이 유지되고 있음을 보여준다.

이상의 결과는 본 연구에서 구축한 DEM이 고도 변화 분석, 지형 단면 변화 평가, 침·퇴적량 산정 등 해안사구 지형 변화 연구에 충분히 활용 가능한 품질 수준을 확보하고 있음을 보여준다. 또한 본 DEM은 향후 다양한 시기별 DEM 자료와의 시계열 변화 분석에서도 안정적인 기준 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

표 1. 검증점을 활용한 DEM 정확도 평가 지수

평가 지수	오차
평균 절대 오차(MAE)	0.332m
평균 제곱근 오차(RMSE)	0.518m
표준편차(STD)	0.516m

*사용된 검증점 수: 54개

2. 해안사구 침·퇴적 변화 분석

계절별 침·퇴적 환경 변화를 분석하기 위해 본 연구에서는 DEM을 기반으로 해안선에서 가까운 곳부터 10개의 측선을 따라 단면도를 작성하였다(그림 7). DEM 기반 고도 중·횡단면 분석은 Python 기반의 공간 분석 프로세스를 활용하여 수행하였으며, geopandas, rasterio, numpy, scipy.signal 및 matplotlib 라이브러리를 통해 단면선 상의 고도 변화 및 고도차(Δ Elevation, 2023년 DEM - 1999년 DEM)를 정량적으로 분석하였다. 측선은 연구지역을 수직으로 가로지르는 8개(A~H), 수평으로 가로지르는 1개(I)로 구성하였다. 측선 A~H는 사질갯벌, 사빈, 전사구, 사구저지대, 후사구를 포함하며, I는 후사구의 변화를 분석하기 위해 수평으로 가로지르도록 설정하였다.

단면 A는 천연기념물 지정구역 최남단에 위치하며, 해변, 전사구, 사구저지대, 후사구로 구성된다. 해변은 약 0~250m 구간에 위치하며 변화가 미미하였다. 전사구는 1999년에는 완만한 경사를 이루었으나, 2023년에는 약 2m 높이의 사구애가 형성되었다. 후사구는 약 50m 후퇴하면서 침식되었으나, 510m 부근에서는 바르한형 사구가 형성되어 고도가 상승하였다. 이는 2010년대에 진행된 사구복원 사업으로 모래 이동량 증가에 따른 결과로 판단된다.

이어지는 단면 B에서도 유사한 변화 양상이 관찰되었다. 전사구는 1999년에 비해 약 2m 상승하여 급사면의 사구애가 형성되었다. 이는 모래포집기의 설치와 미피복사구 확대에 따른 퇴적환경 변화로 분석된다. 반면, 후사구는 모래 공급 부족으로 후퇴하였으며 사구저지대가 확대되었다. A와 B단면에서 나타난 급경사의 후사구는 복합적인 원인의 결과이다. 그중 한 가지는 비교적 해당 단면에 위치하는 사구저지대는 사구내에서 비교적 넓고 미피복사구 및 사구초지가 주로 분포하는 지역이다. 따라서 이들 지역을 중심으로 모래의 공급이 원활하지 못하고, 강한 계절풍의 영향으로 후사구의 경사면을 침식시켜 급경사면을 형성한 것으로 판단된다.

단면 C에서는 전사구 후퇴가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 약 100m까지는 변화가 적었으나, 완사면의 전사구는 급경사의 전사구로 변화하며 전사구는 일부 후퇴하였고, 사구저지대는 축소되었다. 후사구는 최대 3m 높이로 형성되었으며, 이는 관광객 통행로 설치로 인한 국지적 침식과 구조물 설치로 인한 퇴적 증가 영향으로 판단된다.

중앙부에 위치한 단면 D에서는 해변과 전사구의 변화

는 비교적 적었다. 그러나 후사구는 약 100m 후퇴하면서 침식이 우세하였고, 후사구 뒤쪽 사구열 대부분에서도 고도 저하가 관찰되었다. 이는 북서계절풍의 영향으로 풍상면인 후사구가 후퇴하면서 급경사로 변화하였고, 후사구의 경사가 급해지는 풍하면에는 퇴적작용이 활발하게 작용하였다.

중앙부에 위치한 단면 E에서는 1999년에는 큰 규모의 후사구가 한 개 존재했다면, 2023년에는 1차 후사구가 후퇴하며 두 개로 나누어진 듯한 모양의 후사구가 형성되었다. 2차 후사구에는 1차 후사구 뒤로 생긴 경사급변점으로 인하여 후사구애가 전면으로 전진하면서 퇴적환경이 우세해졌다.

사구의 북측으로 이동한 단면 F에서는 해빈과 전사구에서 고도 증가가 나타났다. F단면에서 또한 이전 단면들과 마찬가지로 전사구에서 급격한 경사 변화가 일어났다. 지속적으로 사구의 전사구에서 완사면의 전사구가 급사면이 된 것은 전사구 전면에 설치된 모래포집기의 영향이 가장 큰 것으로 보여지며, 자연적인 변화로는 북서계절풍의 영향이 큰 것으로 판단된다.

단면 G에서는 약 200m까지 변화가 미미하였으며, 이후 급경사의 급애면이 형성되었다. 1차 후사구 지역에서 침·퇴적이 격동적으로 일어났으며, 2차 후사구는 큰 변화가 관찰되지 않았다.

연구지역의 최북단에 위치한 단면 H에서는 1999년 점진적으로 완만한 경사를 가진 사구가 새롭게 형성되었다면, 2023년은 약 210m 지점에서 급경사의 급애면이 형성되며 경사가 급변하는 구간이 생겼다. 이는 전사구 구간에 설치된 모래포집기 등 인공구조물의 영향으로 급사면이 형성된 것으로 판단된다.

단면 I에서는 0~200m 구간에서 고도 변화가 거의 발생하지 않아, 해당 구간은 지난 25년간 비교적 안정된 상태를 유지한 것으로 판단된다. 200~400m 구간에서는 고도차가 -6m 까지 내려가 침식된 것처럼 보이지만, 사구의 형상으로 보아 사구가 뒤로 이동하며 지속적인 퇴적이 이루어진 것으로 판단된다. 900m 이후 북측 구간에서는 고도차가 +2m 이상으로 증가하여, 해당 구간에서 집중적인 퇴적이 발생한 것으로 분석된다.

본 연구지역인 신두리해안사구의 가장 두드러진 공통적 지형 변화는 전사구의 급경사화와 고도 상승이다. A, B, C 단면에서는 전사구가 약 2m가량 상승하면서, 과거의 완사면 지형이 급사면 형태의 사구애로 변형되었다.

이러한 변화는 사구 전면에 설치된 모래포집기나 보강구조물, 그리고 2000년대 이후의 사구복원 사업 등 인공적 요인이 주된 원인으로 분석되며, 동시에 북서계절풍과 같은 자연적 작용도 복합적으로 작용한 것으로 판단된다. 북측 단면인 F, G, H에서도 유사한 경향이 반복되며, 전사구 전면에서 침식이 발생하고 후방부에는 퇴적이 이루어져 급사면이 강화되었다.

후사구의 후퇴와 재형성도 주요한 변화 유형으로 확인되었다. A, B, C, D, E 단면 모두에서 후사구가 수십 미터 이상 후퇴하였고, 특히 A 단면에서는 약 510m 지점에서 새로운 바르한형 사구가 형성되면서 국지적인 고도 상승이 나타났다. E 단면에서는 기존 단일 구조였던 후사구가 두 개의 사구열로 분리되는 경향을 보였으며, 이는 후방부에 새로운 경사 급변점이 형성되었음을 시사한다. 이러한 후사구의 재편성은 인근 사구저지대의 형상, 바람 경로, 모래 공급량 변화 등과 밀접하게 연결되어 있으며, 사구의 역동적인 발달 과정을 잘 반영한다.

또한, 사구저지대의 축소 및 불안정화 역시 A, B, C, D 단면에서 두드러지게 나타났다. 사구저지대는 시간이 지남에 따라 점차 좁아졌으며, 이로 인해 후사구의 풍상면은 집중적으로 침식되었다. 이는 특히 북서계절풍이 사구저지대를 따라 유입되면서 후사구 경사면에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단되며, 침식·퇴적이 단순한 평면 이동이 아닌 사구 구조 전반의 재편성을 유도했음을 시사한다.

중앙부 및 북측 단면(E~H)에서는 국지적 퇴적 현상도 관찰되었다. 이들 구간은 계절풍 영향이 상대적으로 감소하거나, 인공 구조물에 의해 풍향이 교란되면서 특정 지점에 모래가 집중적으로 퇴적되었다. 예를 들어 F 단면에서는 전사구 전면에서 고도가 증가하고, 이후 급경사의 사구애가 형성되었으며, 이는 구조물의 풍향 유도 효과와 관련이 깊은 것으로 해석된다.

한편, 후사구를 가로지르는 I 단면은 특이하게도 0~200m 구간에서 거의 변화가 없는 안정적인 고도 특성이 나타났으며, 이는 이 구간이 지난 25년간 외부 침식 요인의 영향을 적게 받았음을 의미한다. 그러나 200~400m 구간에서는 최대 -6m까지 고도 저하가 나타났고, 900m 이후 구간에서는 +2m 이상의 퇴적이 집중적으로 발생한 것으로 확인되었다. 이로 보아 해당 구간은 침식된 사구가 뒤로 이동하면서 결과적으로 지속적인 퇴적 환경을 유지한 것으로 판단된다.

전체적으로, 연구지역 사구는 전사구 전면의 급경사화

DEM을 활용한 해안사구 중단기 퇴적환경 변화 탐지: 신두리 해안사구를 중심으로

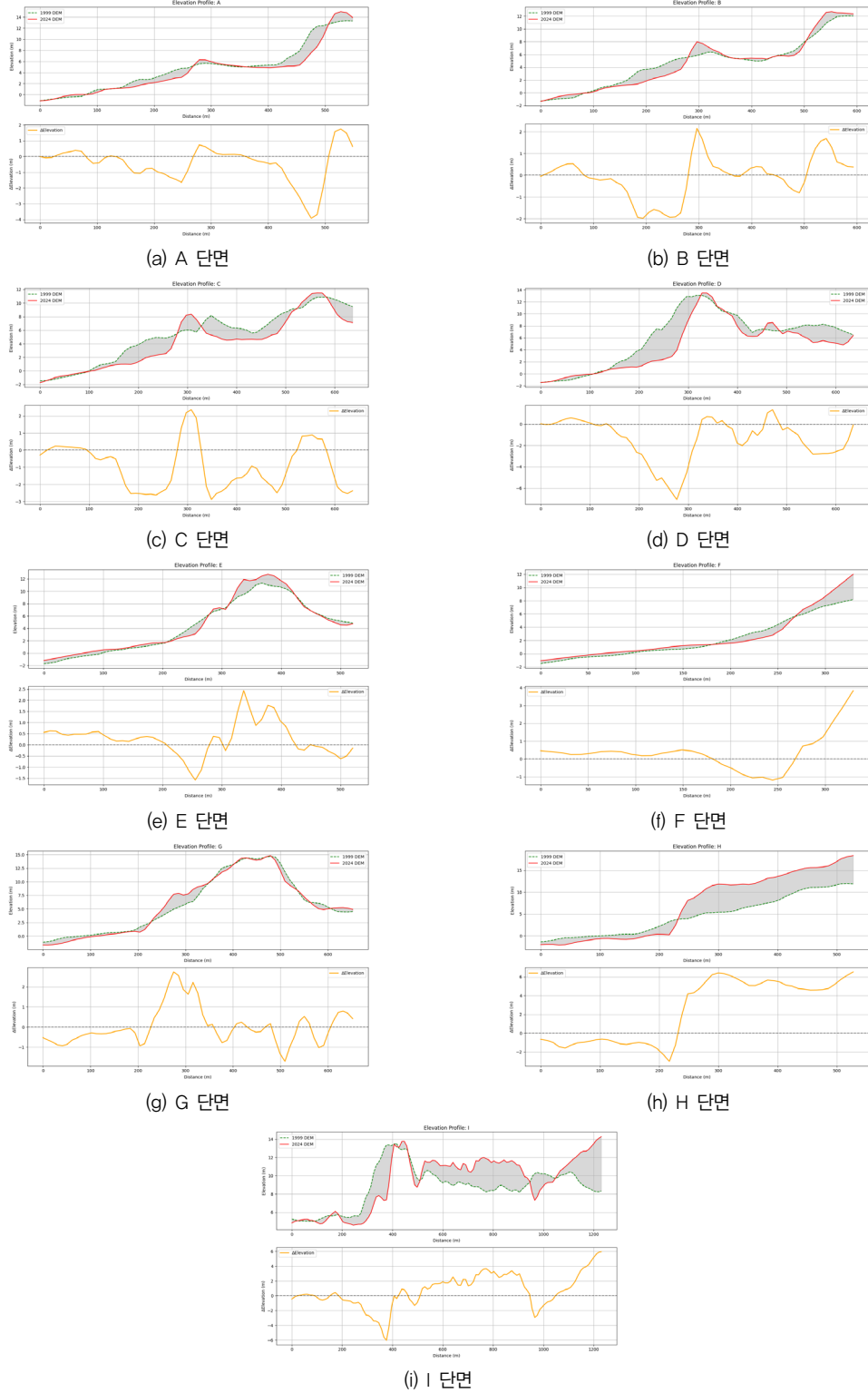


그림 8. 신두리 해안사구 중장기(1999-2023) 종·횡단면 변화 그래프

및 고도 상승, 후사구의 후퇴와 재형성, 사구저지대의 축소, 국지적인 퇴적의 집중, 그리고 후사구의 상대적 안정이라는 다섯 가지 대표적 변화 유형이 관찰된다. 해안사구 지형은 상대적으로 안정적인 상태를 유지하면서도 역동적 변화가 지속되고 있는 것으로 판단된다. 이러한 공간적·시간적 변화는 단순한 표고 변화에 국한되지 않고, 해안 사구 시스템 전반의 형태학적 재편성과 동적 평형의 전이를 의미한다. 특히 인위적 구조물의 영향과 계절풍의 방향성, 그리고 사구복원사업과 같은 관리 정책이 공간적으로 상이한 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 향후 해안사구 관리 및 복원 전략 수립 시, 사구 전체 변화 경향만을 고려하는 접근보다는 구간별 공간적 특성과 변화의 맥락을 반영한 맞춤형 관리 방안 마련이 필요하다.

IV. 결론

본 연구는 1999년과 2023년의 DEM을 활용한 단면 분석을 통해 신두리 해안사구의 중장기 변화 특성을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 해빈, 전사구, 후사구 등 각 지형 요소는 공간적 위치(남북축) 및 구조적 위치(풍상/풍하)에 따라 상이한 침·퇴적 양상을 나타냈으며, 이러한 변화는 풍향 변화와 인위적 요인의 복합 작용으로 인한 것으로 판단된다.

특히, 전사구에서 대부분의 단면(A~C, F~H)은 과거 완사면을 이루었으나, 급경사의 사구애로 전환되었다. 이는 모래포집기, 인공구조물 설치, 사구 복원사업 등의 영향으로 모래가 집중 퇴적된 결과로 해석된다. 해빈은 A~D 단면에서 침식 경향, E~H 단면에서 상대적 안정 또는 퇴적 경향을 나타냈다. 후사구는 대부분 단면에서 후퇴가 진행되었으나, 일부 구간(A, E 등)에서는 바르한형 사구 형성 또는 고도 상승이 관찰되어 퇴적과 후사구의 이동이 동시에 일어났음을 시사한다.

단면 A~D에서는 풍상면 침식과 풍하면 퇴적이 혼재되었으며, 후사구 고도가 저하되거나 급사면화가 진행되었다. 반면, E~H 구간은 전사구에서의 퇴적 경향이 뚜렷해졌고, 후사구는 구조적으로 복잡한 형태(이차 사구에 형성, 분리된 사구열 등)를 보이며 풍향 변화와 지형 조건에 민감하게 반응하고 있었다. 후사구 뒤쪽에서는 풍하 쪽 퇴적 작용이 강하게 나타나며, 사구 이동이 활발히 일어나는 동적 환경으로 해석된다.

또한, 굴설 제거 및 초지 관리 등 사구 복원정책은 후사구 고도 유지 및 퇴적 지속에 기여한 것으로 판단된다. 그러나 관광객 통행로 개설과 같은 국지적 인위 요인은 침식을 유도하며 후사구 경사 급변 및 지형 불안정을 야기하였다.

본 연구의 결과는 신두리 해안사구 관리에 있어 다음과 같은 시사점을 갖는다. 첫째, 사구 전면에 설치된 구조물과 복원 시설은 침·퇴적 환경에 복합적 영향을 미치므로, 설치 전후의 지형 동태 변화에 대한 정밀한 평가 및 시계열 DEM 모니터링이 반드시 병행되어야 한다. 둘째, 최근 기후 변화에 따른 풍향 패턴 변화는 사구 이동 및 구조적 재편에 영향을 미치고 있으며, 이에 대응하기 위해서는 장기적인 기상 관측 자료와 지형 변화 데이터를 통합한 분석 체계 구축이 필요하다. 셋째, 사구 복원 및 관광 기반 시설 계획은 퇴적 경로, 사구 형상, 풍향 분포를 통합적으로 고려하는 종합 관리 방안을 통해 사구의 자연 발달을 보존하고, 인위적 개입의 부작용을 최소화하는 방향으로 조정될 필요가 있다.

아울러, 본 연구에서 활용한 DEM 기반 단면 분석 기법은 해안사구의 침·퇴적 변화를 정량적으로 평가하는 데 있어 효율적이며 재현 가능한 도구로서, 향후 타 지역 적용 및 해안관리 정책 수립에도 유용하게 활용될 수 있다. 특히, 시계열 DEM 분석과 현장 기반 모니터링의 연계성을 통해 예측 기반의 탄력적 연안 대응 전략 마련이 가능해질 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 장기 기후 변화와 사구 지형 변화 간의 인과적 관계를 보다 정밀하게 규명하고, 복합적인 자연·인위 요인을 반영한 다차원적 사구 변화 모델 개발과 함께, 지역별 맞춤형 관리전략 제안으로 연구를 확장할 필요가 있다. 이를 통해 변화하는 연안 환경에 능동적이고 지속가능한 대응이 가능할 것이다.

참고문헌

- 김대현, 2004, “식생의 공간적 분포와 토양·지형·거리 요소들 사이의 관계에 관한 연구: 신두리 해안사구지대를 사례로,” 서울대학교 석사학위논문.
- 김민호, 2002, “디지털 지상사진을 이용한 해안사구의 단면 측정,” 서울대학교 석사학위논문.
- 김민호·유근배·조봉환, 2002, “디지털 사진측량에 의한 해안사구의 고도값 측정,” Spatial Information Research,

- 10(2), 317-329.
- 문화재청, 2005, 「신두리 해안사구 생태계 보존관리 교육 및 연구 보고서」, 대전: 문화재청.
- 서종철, 2001, “서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지,” 서울대학교 일반대학원 석사학위 논문.
- 서종철, 2002, “원격탐사와 GIS 기법을 이용한 신두리 해안사구지대의 지형변화 분석,” *지역과 지리*, 8(1), 98-109.
- 서종철, 2005, “신두리 지역 고사구의 OSL 연대측정,” *지역과 지리*, 11(1), 114-122.
- 송영선, 2021, “자연관광자원 관리를 위한 드론매핑시스템의 활용: 신두리 해안사구를 중심으로,” *관광레저연구*, 33(9), 67-82.
- 신대섭·서종철, 2011, “지상 라이다를 이용한 단기간 해빈과 해안사구의 지형변화 연구,” *한국지형학회지*, 18(4), 283-296.
- 윤공현·이창경·김경수, 2022, “신두리 해빈 장기해안지형 변화 탐지 및 추정,” *대한원격탐사학회지*.
- 한국동력자원연구소, 1982, 「지질도폭설명서: 대산·이곡」, 대전:한국동력자원연구소.
- 한충목·김용석, 2009, “시계열 분석을 통한 송도해안의 해안사구 이동 경로 분석,” *한국콘텐츠학회논문지*, 9(8), 384-391.
- 홍성찬·최정현·김종욱, 2010, “홀로세 중기 이후 신두리 해안사구의 성장: 기후변화 및 해수면 변동과의 관련 가능성,” *한국지형학회지*, 17(2), 87-98.
- Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., and de Vries, M. B., 2011, How ecological engineering can serve in coastal protection, *Ecological Engineering*, 37(2), 113-122.
- Burvingt, O. and Castelle, B., 2023, Storm response and multi-annual recovery of eight coastal dunes spread along the Atlantic coast of Europe, *Geomorphology*, 435, 108735.
- Duffy, J. P., Shutler, J. D., Witt, M. J., DeBell, L., and Anderson, K., 2018, Tracking fine-scale structural changes in coastal dune morphology using kite aerial photography and uncertainty-assessed structure-from-motion photogrammetry, *Remote Sensing*, 10(9), 1494.
- Dunlop, T., Khojasteh, D., Cohen-Shacham, E., Glamore, W., Haghani, M., van den Bosch, M., Rizzi, D., Greve, P., and Felder, S., 2024, The evolution and future of research on nature-based solutions to address societal challenges, *Communications Earth & Environment*, 5(1), 132.
- Feagin, R. A., Figlus, J., Zinnert, J. C., Sigren, J., Martínez, M. L., Silva, R., Smith, W. K., Cox, D., Young, D. R., and Carter, G., 2015, Going with the flow or against the grain? The promise of vegetation for protecting beaches, dunes, and barrier islands from erosion, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(4), 203-210.
- Höhle, J. and Höhle, M., 2009, Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398-406.
- Plan Bleu, 2025, *Nature-based Solutions and Ecosystem-based Adaptation in the Mediterranean*, Marseille: Plan Bleu.
- Wessel, B., Huber, M., Wohlfart, C., Marschall, U., Kosmann, D., and Roth, A., 2018, Accuracy assessment of the global TanDEM-X digital elevation model with GPS data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 171-182.
- 국가유산포털, <https://www.heritage.go.kr/>
- 기상청, 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/>
- 교신 : 장동호, 32588, 충남 공주시 공주대학로 56, 공주대학교 인문사회과학대학 지리학과
(이메일: gisrs@kongju.ac.kr)
- Correspondence: Dong-Ho Jang, 32588, 56 Gongjudaehak-ro, Gongju-si, Chungcheongnam-do, South Korea, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, Kongju National University (Email: gisrs@kongju.ac.kr)
- 투고접수일: 2025년 7월 28일
심사완료일: 2025년 8월 25일
게재확정일: 2025년 9월 10일