

표층 퇴적물 분석을 통한 신두리 해안사구지대의 퇴적 환경 특성*

정근비** · 윤광성*** · 장동호****

Sedimentary Environmental Characteristics of the Sinduri Coastal Dune System Based on Surface Sediment Analysis*

Geun-Bi Jeong** · Kwang-Sung Yun*** · Dong-Ho Jang****

요약 : 본 연구는 신두리 해안사구지대를 대상으로 표층 퇴적물의 입도 및 이화학적 특성을 분석하여 퇴적 환경의 공간적·계절적 변동 양상을 분석하였다. 표층 퇴적물 시료는 겨울·봄·여름철에 사질갯벌, 사빈, 전사구, 사구저지대, 후사구에서 채취하였다. 입도분석 결과, 연구지역 전체에서 중립사가 우세하였으며, 계절적으로는 봄철 조립화와 여름철 세립화 경향이 확인되었다. 공간적으로는 해안에서 내륙으로 갈수록 입도가 세립해지는 경향이 겨울철에 부분적으로 관찰되었으나, 사빈과 인접한 사구 지형 간의 입도 차이는 크지 않았다. 이화학적 분석 결과, 해수 기원의 치환성 양이온 농도는 해안선으로부터 거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 다변량 통계 분석 결과, 제1·제2 주성분이 전체 분산의 91.3%를 설명하였으며, 이는 주로 입도 분포와 세립 성분 함량의 변동을 반영한다. 군집 분석을 통해 퇴적물의 공간 분포가 계절에 따라 차이를 확인하였으며, 이는 계절적 변동성과 지형적 조건의 복합적인 영향을 반영한다.

주요어 : 신두리 해안사구, 표층 퇴적물, 입도 특성, 다변량 통계 분석, 퇴적 환경

Abstract : This study investigates the spatial and seasonal variability of the sedimentary environment in the Sinduri coastal dune system through analyses of grain-size and physicochemical properties of surface sediments. Surface sediment samples were collected from sandy tidal flats, beaches, foredunes, interdune lowlands, and backdunes during winter, spring, and summer. Grain-size analysis revealed that medium sand was dominant throughout the study area, with a seasonal trend characterized by coarsening in spring and fining in summer. Spatially, a gradual fining trend from the coast toward inland areas was partially observed during winter; however, grain-size differences between the beach and adjacent dune units were relatively small. Physicochemical analyses showed that concentrations of exchangeable cations of marine origin decreased with increasing distance from the shoreline. Multivariate statistical analysis indicated that the first and second principal components accounted for 91.3% of the total variance, primarily reflecting variations in grain-size distribution and fine-grained sediment content. Cluster analysis further demonstrated that the spatial distribution of sedimentary characteristics varied seasonally, reflecting the combined influence of seasonal forcing and geomorphic settings.

Key Words : Sinduri coastal dune system, Surface sediments, Grain-size characteristics, Multivariate analysis, Depositional environment

*이 논문은 2025년 국립공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음.

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

***한국환경지리연구소 대표(CEO, Korea Environmental Geography Research Institute, geoeco@daum.net)

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

I. 서론

해안사구는 해변과 간석지의 모래가 바람에 의해 운반 및 퇴적되어 형성된 지형으로, 육지와 바다 사이의 접이 지대에서 자연 방파제 역할을 수행하며 배후지를 보호하는 중요한 공간이다. 특히 충남 태안군에 위치한 신두리 해안사구는 한국 최대 규모의 해안사구로서, 그 지형적·생태적 가치를 인정받아 천연기념물 제431호 및 해양생태계보호구역으로 지정되어 관리되고 있다. 이러한 해안사구의 형성과 발달 과정을 이해하고 효율적인 관리방안을 모색하기 위해서는 사구를 구성하는 퇴적물의 물리적 특성과 이동 메커니즘을 파악하는 것이 필수적이다.

퇴적물의 입도 특성은 퇴적 환경의 에너지 조건과 운반 기작을 반영하는 가장 기본적이면서도 중요한 지표이다. 일반적으로 퇴적학적 이론에 따르면, 해안사구 시스템에서는 해변에서 사구 내륙으로 갈수록, 그리고 바람의 에너지가 감소할수록 입자의 크기가 작아지고 분급(sorting)이 양호해지는 경향이 나타난다. 이러한 입도 변수(평균 입도, 분급, 왜도 등)의 분석은 퇴적물의 기원지 추적, 운반 거리, 그리고 퇴적 환경을 구분하는 데 널리 활용되어 왔다.

최근의 국외 연구들은 단순한 입도분석을 넘어, 사구 지형의 변화와 퇴적물 이동의 상관관계를 다각도로 규명하고 있다. Hesp(2002; 2013) 등은 전사구(foredune)와 취식와지(blowout) 등 미지형 내에서의 공기 역학적 흐름과 퇴적물 이동의 관계를 규명하였으며, Bauer *et al.* (2022) 등은 식생 피복의 밀도와 종류가 퇴적물 이동과 퇴적 양상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한, Abuodha(2003)는 케냐 해안의 사구와 해변 퇴적물에 대한 입도분석을 통해 계절적 변화와 지형 단위별 퇴적물 특성을 통계적으로 분류하였으며, Kasper-Zubillaga *et al.* (2007)은 멕시코 사구의 입도 및 광물학적 분석을 통해 퇴적물의 기원과 풍화 정도를 파악하였다. 최근에는 기후 변화와 해수면 상승에 대응하기 위한 자연기반해법(NbS)으로서 해안사구의 복원력과 퇴적물 수지(sediment budget)를 연계하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내, 특히 신두리 해안사구를 대상으로 한 연구들은 주로 지형 변화, 식생 분포, 그리고 퇴적물의 이동 메커니즘에 초점을 맞춰왔다. 박동원과 유근배(1979)의 초기 연구 이후, 서종철(2001; 2002)은 항공사진과 측량을 통해 신두리 사구의 지형 변화와 토지 피복 변화를 시계열적으

로 분석하였다. 류완상(2002)은 신두리 해안사구의 바람과 비사(flying sand)에 관한 연구를 통해, 사구의 모래가 해변 모래보다 세립하고 분급이 양호하다는 일반적인 경향을 확인하였으며, 입계 풍속 이상의 바람에 의한 모래 이동 특성을 규명하였다.

또한, 퇴적물의 지화학적 특성과 관련된 연구들도 수행되었다. 유근배 등(2005; 2012)과 신영호 등(2015)은 사구 퇴적물의 입도와 치환성 양이온 농도 간의 관계를 분석하여, 비사가 사구 생태계에 영양분을 공급하는 주요 경로를 밝혔다. 전사구와 2차 사구 간의 물리·화학적 특성 차이를 제시하였다. 신영호와 서종철(2014)은 신두리 해역의 조하대와 해변 퇴적물이 여름철에는 세립해지고 겨울철에는 조립해지는 계절적 변동성을 보고하며, 해변-사구 시스템의 퇴적물 순환을 강조하였다. 최근에는 송영선(2021)과 정근비 등(2025)이 드론(UAV)과 DEM을 활용하여 해안사구의 정밀한 지형 변화를 탐지하고 침·퇴적 양상을 시각화하는 연구를 수행하였다.

그러나 기존의 국내 연구들은 대부분 해변, 전사구, 2차 사구와 같은 형태적 구분을 사전 정의된 기준으로 적용하여 퇴적물 특성을 서술하는 방식에 의존해 왔다. 이러한 전통적인 지형학적 구분은 거시적인 퇴적 환경을 이해하는 데 유용하지만, 복잡한 미지형과 인위적인 방파제 조성, 계절풍의 영향 등이 혼재된 신두리 사구의 국지적인 퇴적 특성을 정밀하게 설명하기에는 한계가 있다. 특히 신두리 해안사구는 계절에 따른 풍향 변화와 인공 구조물(모래 포집기 등)의 영향으로 퇴적 환경이 복잡하게 나타나며, 기존 이론과 달리 전사구와 배후 사구 간의 입도 특성 차이가 크지 않거나 역전되는 현상이 발생할 가능성이 있다.

따라서 본 연구는 기존의 지형적 구분에 의존하지 않고, 퇴적물 자체의 통계적 특성에 기반하여 신두리 해안사구의 퇴적 환경을 재해석하고자 한다. 기존 연구들이 지형 단위별 평균적인 특성을 비교하는 데 그쳤다면, 본 연구는 신두리 해안사구 전역에서 채취한 표층 퇴적물의 정밀 입도분석 데이터를 바탕으로 다변량 통계 기법인 클러스터 분석(Cluster Analysis)을 시도하였다.

본 연구는 신두리 해안사구 표층 퇴적물의 입도 특성(평균 입도, 분급, 왜도 등)을 정밀 분석하여, 해변에서 내륙으로 갈수록 입자가 세립화된다는 기존의 일반적인 해안사구 퇴적 이론이 신두리 해안사구에 적용 가능한지를 검토해보고자 한다. 또한, 군집 분석을 통해 퇴적물의 물

리적 특성이 유사한 지점들의 분포 양상을 분석함으로써, 기존의 지형학적 구분만으로는 설명하기 어려운 퇴적환경의 공간적 특성을 입도 자료 기반에서 해석하고자 하였다. 이러한 분석은 신두리 해안사구 내 퇴적물 이동과 에너지 환경의 공간적 차이를 이해하는 데 기초적인 정보를 제공하며, 향후 해안사구 관리 및 보전을 위한 퇴적학적 관점의 활용 가능성을 검토하는 데 참고 자료로 활용될 수 있을 것이다.

II. 연구지역 및 연구방법

1. 연구지역

본 연구의 대상지인 신두리 해안사구는 행정구역상 충청남도 태안군 원북면 신두리에 위치하며, 태안반도의 북서부 해안을 따라 형성되어 있다(그림 1). 신두리 해안사구는 해안선의 길이가 약 3.4km, 사구의 폭은 0.5~1.3km에 이르는 한국 최대 규모의 해안사구로서, 사구의 원형이 잘 보존되어 있어 학술적 가치가 매우 높다. 이러한 지형적·생태적 중요성을 인정받아 사구 지대 일원은 2001년 문화재청(현 국가유산청)에 의해 천연기념물 제 431호로 지정되었으며, 사구 전면부 해역은 2002년 해양수산부에 의해 해양생태계보호구역으로 지정되어 관리되고 있다(국가유산 포털).

지질학적으로 연구 지역 일대는 선캄브리아기 서산층군 이북리층(주로 흑운모편암)을 기반암으로 하고 있으며, 그 상부에 신생대 제4기의 충적층이 두껍게 피복되어 있다. 지형적으로는 해안 만입부의 사빈 배후를 따라 사구가 발달한 형태를 띠며, 지형 단면, 표층 퇴적물의 특성 등에 따라 개방형 연안부(open-coast area)와 만입형 연안부(embayment coastal area)로 구분되기도 한다. 신두리 해안은 조차가 크고 완만한 경사를 이루고 있어 썰물 시 넓은 사질 간석지가 노출되는데, 이는 사구 형성에 필요한 모래를 공급하는 중요한 공급원 역할을 한다(한국동력자원연구소, 1982).

신두리 해안사구의 형성과 발달은 이 지역의 독특한 기후 조건, 특히 바람의 영향과 밀접한 관련이 있다. 태안 AWS(1991~2020년) 자료에 따르면, 이 지역의 연평균 풍속은 1.9m/s이지만, 사구 형성에 결정적인 역할을 하는 겨울철에는 강한 북서계절풍이 우세하게 나타난다(기상

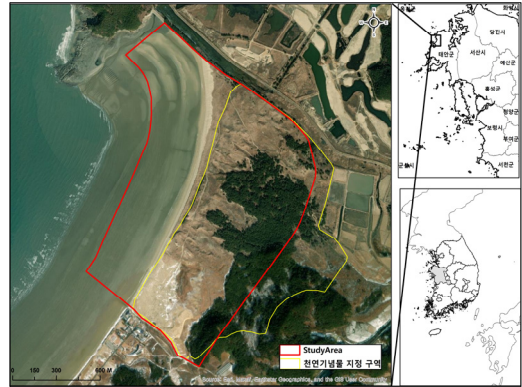


그림 1. 연구지역

청). 겨울철의 강한 북서풍은 건조된 해빈과 간석지의 모래를 내륙으로 운반하는 주된 동력원으로 작용하며, 이에 따라 겨울철에는 사구로 유입되는 모래의 양이 증가하고 조립질 퇴적물의 분포 범위가 해빈 방향으로 확장되는 경향을 보인다. 반면, 여름철에는 남서풍 또는 남동풍 계열의 바람이 우세하고 강수량이 집중되어 사구의 성장보다는 식생의 정착이나 세립질 퇴적물의 유입이 일어나는 환경이 조성된다.

식생 분포를 살펴보면, 사구 지대에는 통보리사초, 갯그령, 해당화, 순비기나무 등 전형적인 사구 식물 군락이 발달해 있어 모래의 퇴적과 사구 지형의 안정화에 기여하고 있다(강대균, 2006). 그러나 1970년대 이후 인위적인 방사림 조성과 해안 구조물 설치 등으로 인해 국지적인 퇴적 환경의 변화가 보고되고 있으며, 이는 본 연구에서 규명하고자 하는 퇴적물의 입도 특성 및 구역화 분석에 있어 고려해야 할 중요한 환경적 요인이다.

2. 연구방법 및 사용자료

본 연구는 신두리 해안사구의 표층 퇴적 환경 특성을 체계적으로 분석하기 위하여 표층퇴적물에 대한 입도분석 및 이화학적 분석, 통계 분석 및 공간·계절적 변동성을 분석하였다(그림 2). 먼저 해빈 및 사구지역을 대상으로 표층퇴적물을 채취하여 입도 특성 분석과 유기물 함량 분석을 실시하였다. 퇴적물 시료 채취는 겨울철 1회, 봄철 1회, 여름철 1회로 총 3회 수행하였다. 가을철 자료는 현장 조사 여건과 분석 일정상의 제약으로 포함하지 못하였으며, 겨울·봄·여름철 자료를 중심으로 계절별 퇴적물 특

표 1. 퇴적물 현장 조사 일시 및 시료 채취 개수

계절	조사 일정	퇴적물 입도분석	유기물 분석
겨울철	2024.02.15.(목) ~ 2024.02.16.(금)	75개	-
봄철	2024.04.25.(금) ~ 2024.04.27.(일)	77개	18개
여름철	2024.07.25.(목) ~ 2024.07.26.(금)	77개	-

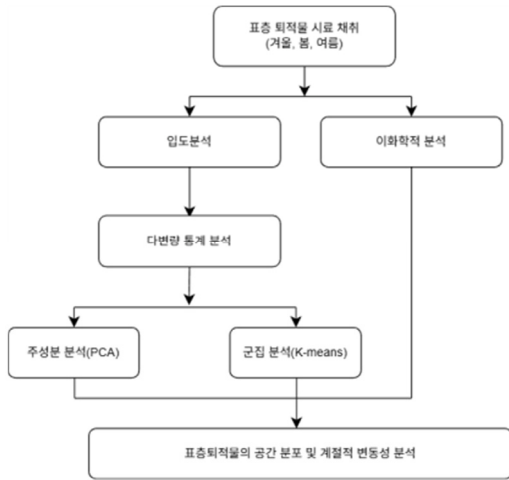


그림 2 연구흐름도

성을 분석하였다(표 1, 그림 3). 표층 퇴적물 시료는 각 조사 지점에서 지표면 상부의 오염 가능성을 고려하여 약 2cm 정도를 제거한 후, 그 하부의 0-5cm 깊이에 해당하는 퇴적물을 대상으로 채취하였다. 시료 채취에는 모종삽을 사용하였으며, 낙엽 등 유기물은 제거한 후 동일한 기준과 방법으로 퇴적물을 수집하였다.

다음으로, 획득한 표층퇴적물을 전처리 한 후 입도분석과 이화학적 분석을 실시하였다. 퇴적물 입도분석에서는 계절별로 퇴적상 분류 및 토성, 입도, 분급, 왜도, 첨도 값을 획득하였으며, 토성분석은 해안사구의 특성에 맞춰 silt-sand-clay 로 분류하였다. 평균입도, 분급, 왜도, 첨도는 Folk and Ward(1957)의 그래픽 방법을 적용하여 계산하였다. 분급도의 해석 기준은 Folk and Ward(1957)에 따라 0.35 ϕ 이하를 양호(well sorted), 0.35-0.50 ϕ 를 보통(moderately sorted), 0.50 ϕ 초과를 불량(poorly sorted)으로 구분하였으며, 실트와 점토의 입도 구분 기준은 8 ϕ 를 적용하였다. 이화학적 분석에서는 토성, pH, EC, 유기물, 유효인산, Ex.K, Ex.Ca, Ex.Na, Ex.Mg, CEC 값을 획득하였다(농촌진흥청 농업과학기술원, 2000).

마지막으로 표층 퇴적물 입도 특성의 종합적인 변동 양

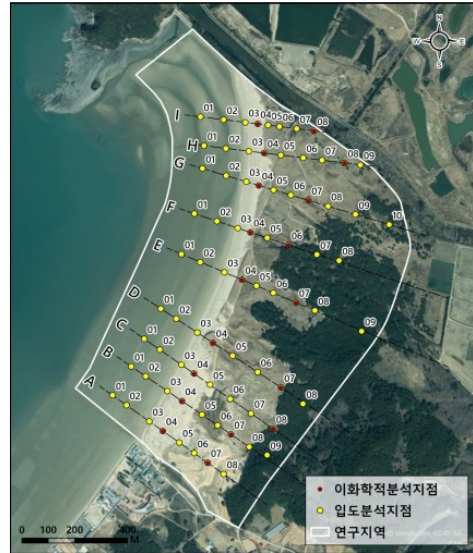


그림 3. 입도 및 이화학적 분석 지점

상을 분석하기 위해 다변량 통계 분석을 수행하였다. 분석에는 평균입도, 분급도, 왜도, 실트·점토 함량의 네 가지 입도 변수를 사용하였다. 우선 주성분 분석(PCA)을 적용하여 다차원 입도 자료를 소수의 주요 성분으로 축소하고, 각 성분이 퇴적물 특성 변동에 기여하는 상대적 중요도를 평가하였다. 주성분 분석에 사용된 입도 변수들은 단위와 분산의 차이를 보정하기 위해 z-score 방식으로 표준화한 후 분석을 수행하였다. 주성분의 해석은 각 변수의 요인 적재량과 주성분이 설명하는 분산 비율을 기준으로 수행하였다. 다음으로 주성분 분석 결과를 바탕으로 표층 퇴적물의 입도 특성에 따른 유형화를 위해 k-means 군집 분석을 수행하였다. 군집 수(k)는 주성분 공간에서 군집 간 분리가 가장 뚜렷하고 퇴적학적 해석이 가능한 k=5를 적용하였다. 각 군집의 평균입도, 분급도, 왜도 및 실트·점토 함량을 산출하여 군집별 특성을 비교하였다. 군집 분석 결과는 계절별로 구분하여 제시하였으며, 이를 공간적으로 시각화함으로써 각 군집의 분포 특성과 계절에 따른 변화 양상을 분석하였다. 이를 통해

신두리 해안사구 표층 퇴적물이 계절적 변동성과 지형 조건에 따라 어떻게 유형화되는지를 파악하였다.

III. 해안사구 표층퇴적물 비교·분석

1. 표층퇴적물 입도분석

1) 겨울철

겨울철 표층 퇴적물의 입도 특성을 분석한 결과, 사질갯벌의 평균입도는 2.00 ϕ 로 연구 지역 내에서 가장 조립한 특성을 보였다. 분급은 0.59 ϕ 로 지형 유형 중 가장 양호한 분급을 나타냈다. 또한 침도는 0.96, 왜도는 0.07로 사빈과 더불어 가장 낮은 값을 기록하였다. 사질갯벌의 퇴적상은 주로 사질(S)로 구성되어 있다(표 2).

사빈의 평균입도는 2.06 ϕ 이며, 분급은 1.03 ϕ 로 대체로 불량한 분급을 보였다. 왜도는 사질갯벌과 동일하게 가장 낮은 0.07로 나타났으며, 침도는 1.43이다. 퇴적상은 주로 사질(S)이 우세하다. 전사구는 평균입도 2.05 ϕ , 분급 1.50 ϕ 로 지형 유형 중 분급이 가장 불량한 것으로 나타났다. 왜도는 0.18, 침도는 1.91로 항목 중 가장 높은 수치를 보였으며, 퇴적상은 주로 사질(S)이다. 사구저지대의 평균입도는 2.05 ϕ , 분급은 1.30 ϕ 로 불량한 분급 특성을 보였다. 왜도는 0.17, 침도는 1.59로 나타났으며, 퇴적상은 주로 사질(S) 및 실트질 모래(zS)로 확인되었다. 후사

구의 평균입도는 2.07 ϕ 로 입도가 가장 세립하게 나타났으며, 분급은 1.38 ϕ 로 불량하였다. 침도(1.61)와 왜도(0.29)는 지형 유형 중 가장 높은 값을 보였다. 후사구의 퇴적상은 주로 사질(S)과 실트질 모래(zS)이다.

신두리 해안사구지대의 겨울철 퇴적물 분석 결과, 사구 지형 유형에 따라 평균입도와 퇴적상은 큰 차이가 나타나지 않았다. 반면 사질갯벌과 사빈은 상대적으로 양호한 분급을 보였으나 전사구, 사구저지대, 후사구에서는 분급이 불량하고 왜도와 침도가 높게 나타났다. 이는 겨울철 북서계절풍에 의해 사구지대 전반에서 퇴적물이 반복적으로 재이동하면서 평균입도는 균질화된 반면, 미지형 및 식생 조건에 따른 퇴적 환경 차이가 입도 분포 특성에 반영된 결과로 판단된다.

2) 봄철

사질갯벌의 평균입도는 1.92 ϕ , 분급은 0.43 ϕ 로 양호한 분급을 보였으며, 왜도는 0.05, 침도는 0.80으로 나타났다. 퇴적상은 주로 역질사(gS)와 사질(S)이 분포한다(표 3).

사빈은 평균입도 2.02 ϕ , 분급 0.40 ϕ 로 양호한 분급을 보였다. 왜도(-0.02)와 침도(0.75)는 모든 지형 유형 중 가장 낮은 값을 기록하였으며, 특히 왜도는 음성 왜도(negatively skewed)의 경향을 띤다. 퇴적상은 사질(S)이다. 전사구의 평균입도는 1.91 ϕ 로 지형 유형 중 가장 조립질이며, 분급은 0.43 ϕ 로 양호하였다. 왜도는 0.06, 침도는 0.81이며, 퇴적상은 주로 사질(S)로 나타났다. 사구저

표 2. 신두리 해안사구 겨울철 사구지형 유형별 입도분석 결과

구분	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	침도	퇴적상
사질갯벌	2.00	0.59	0.07	0.96	S
사빈	2.06	1.03	0.07	1.43	S
전사구	2.05	1.50	0.18	1.91	S
사구저지대	2.05	1.30	0.17	1.59	S, zS
후사구	2.07	1.38	0.29	1.61	S, zS

표 3. 신두리 해안사구 봄철 사구지형 유형별 입도분석 결과

구분	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	침도	퇴적상
사질갯벌	1.92	0.43	0.05	0.80	(g)S, S
사빈	2.02	0.40	-0.02	0.75	S
전사구	1.91	0.43	0.06	0.81	S
사구저지대	1.99	0.90	0.17	1.12	S, zS
후사구	1.95	1.10	0.33	1.58	S, zS

지대의 평균입도는 1.99 ϕ , 분급은 0.90 ϕ 이며, 왜도는 0.17, 침도는 1.12로 확인되었다. 퇴적상은 대부분 모래로 구성된 사질(S) 및 실트질 모래(zS)이다. 후사구의 평균입도는 1.95 ϕ , 분급은 1.10 ϕ 로 불량한 분급을 보였다. 왜도(0.33)와 침도(1.58)는 지형 유형 중 가장 높게 나타났다. 퇴적상은 대부분 모래로 구성되며 주로 사질(S)과 실트질 모래(zS)이다.

신두리 해안사구지대의 봄철 퇴적물 분석 결과, 겨울철과 마찬가지로 사구지형 유형에 따른 평균입도의 차이는 크지 않게 나타났다. 사질겅벌, 사빈, 전사구에서는 전반적으로 양호한 분급과 낮은 왜도·침도가 유지되었으나, 사구저지대와 후사구에서는 분급이 상대적으로 불량하고 왜도와 침도가 높게 나타났다. 이는 겨울철 북서계절풍에 의해 재이동된 퇴적물이 봄철까지 유지되었으나 사구 미지형과 식생 조건에 따라 입도 분포 특성의 공간적 차이가 부분적으로 반영된 결과로 판단된다.

3) 여름철

사질겅벌의 평균입도는 2.01 ϕ , 분급은 0.82 ϕ , 왜도는 0.08, 침도는 1.20으로 나타났다. 퇴적상은 대부분 모래로 구성된 사질(S)이다(표 4).

사빈의 평균입도는 1.99 ϕ 로 지형 유형 중 가장 조립하게 나타났으며, 분급은 0.74 ϕ 로 보통(moderately sorted) 수준이나 다른 지형에 비해서는 양호한 편이다. 왜도(0.04)와 침도(1.08)는 지형 유형 중 가장 낮은 값을 보였다. 퇴적상은 주로 사질(S)이다. 전사구의 평균입도는 2.05 ϕ , 분급은 1.36 ϕ , 왜도는 0.17로 나타났다. 침도는 1.67로 지형 유형 중 가장 높은 값을 보였으며, 퇴적상은 주로 사질(S)이다. 사구저지대의 평균입도는 2.20 ϕ 로 가장 세립한 입도 특성을 보였다. 분급은 1.60 ϕ , 왜도는 0.29, 침도는 1.55로 나타났으며, 퇴적상은 주로 사질(S) 및 실트질 모래(zS)이다. 후사구의 평균입도는 2.17 ϕ 이며, 분급은 1.80 ϕ 로 지형 유형 중 가장 불량한 분급을 보였다. 왜도는 0.31

로 가장 높은 값을, 침도는 1.55를 나타냈다. 퇴적상은 주로 사질(S) 및 실트질 모래(zS)이다.

신두리 해안사구지대의 여름철 퇴적물 분석 결과, 지형 유형에 따른 평균입도의 차이는 크지 않게 나타났다. 그러나 전사구, 사구저지대, 후사구에서는 분급이 불량해지고 왜도와 침도가 증가하였다. 이는 여름철에 사구 내부로 이동된 세립질 물질이 재비산되지 않고 상대적으로 잔류하기 쉬운 환경 조건이 형성되면서, 평균입도는 유사하게 유지된 반면 분급과 분포 특성에 지형적 차이가 반영된 결과로 판단된다.

2. 표층퇴적물 이화학적 분석

표층 퇴적물 시료에 대한 이화학적 분석을 수행하여 토성, pH(수소이온농도), EC(전기전도도), 유기물, 유효인산, Ex.K(치환성 칼륨), Ex.Ca(치환성 칼슘), Ex.Na(치환성 나트륨), Ex.Mg(치환성 마그네슘), CEC(양이온치환용량) 값을 도출하였다(표 5).

pH는 식물의 성장과 토양 내 미네랄 흡수에 영향을 미치는 인자로, pH 7(중성)을 기준으로 알칼리성과 산성을 구분한다. 서해안에 위치한 해안사구는 대체로 pH 6~8 범위를 보이나, 신두리 해안사구의 경우 평균 pH 7.0을 중심으로 지점별로 5.0~9.4의 넓은 분포를 보여 약산성에서 강알칼리성까지 다양한 토양 특성을 나타냈다. 이는 신두리 해안사구의 다양한 지형적 특성이 반영된 결과로 판단된다. 전사구열, 후사구열 및 사구 저지 사이의 둔덕에서는 비교적 높은 염기성 수치가 측정된 반면, 사구 저지 양쪽에서는 가장 낮은 산성 수치가 확인되었다. 특히 전사구 북쪽에 위치한 G-04, H-04, I-04 지점은 pH 9.4의 강알칼리성을 띠는데, 이러한 현상은 전사구 중에서도 해안과 인접한 풍상 사면에서 더욱 뚜렷하다. 토양 pH의 공간적 분포는 세립사함량의 분포와 양의 상관관계를 보이나, 후사구 곱솔군락지를 중심으로 그 유사성이 감

표 4. 신두리 해안사구 여름철 사구지형 유형별 입도분석 결과

구분	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	침도	퇴적상
사질겅벌	2.01	0.82	0.08	1.20	S
사빈	1.99	0.74	0.04	1.08	S
전사구	2.05	1.36	0.17	1.67	S
사구저지대	2.20	1.60	0.29	1.55	S, zS
후사구	2.17	1.80	0.31	1.55	S, zS

표 5. 표층 퇴적물 이화학적 분석 결과

지점	pH (1:5)	EC (dS/m)	유기물 (g/kg)	유효인산 (mg/kg)	CEC	Ex.Ca	Ex.K	Ex.Mg	Ex.Na
					(cmol+/kg)				
A-04	8.1	0.08	1.87	23.53	2.50	1.41	0.21	0.60	0.13
A-07	6.6	0.02	1.30	19.03	2.50	0.97	0.10	0.52	0.03
B-04	8.0	3.28	1.34	19.85	2.95	2.62	0.34	1.16	2.58
B-07	5.8	0.05	0.99	14.94	3.30	0.47	0.07	0.28	0.03
C-04	8.0	0.06	1.81	14.12	2.42	1.66	0.15	0.34	0.09
C-08	5.0	0.08	5.49	10.50	2.43	0.27	0.05	0.15	0.02
D-04	5.2	0.12	8.35	28.68	2.41	0.62	0.16	0.46	0.77
D-07	6.2	0.08	11.86	69.84	2.96	1.83	0.11	0.26	0.03
E-04	6.2	0.13	6.05	13.64	2.61	1.53	0.22	0.46	0.03
E-07	5.2	0.13	5.9	31.05	1.82	0.19	0.05	0.07	0.01
F-04	8.9	0.14	2.29	19.89	1.7	5.61	0.28	0.69	0.22
F-06	5.4	0.03	8.23	17.41	2.48	0.73	0.07	0.35	0.07
G-04	9.4	0.14	3.7	27.32	3.44	8.28	0.19	0.64	0.09
G-07	5.9	0.04	12.56	33.67	2.03	1.00	0.2	0.31	0.02
H-04	9.4	0.17	2.72	22.11	1.23	7.2	0.22	0.56	0.32
H-08	5.8	0.06	1.93	12.78	1.37	0.49	0.06	0.24	0.01
I-04	9.4	0.13	2.42	25.21	1.94	6.79	0.32	0.73	0.23
I-08	6.7	0.08	3.84	22.27	1.88	1.19	0.12	0.31	0.02

소하는 경향이 있다. 곰솔군락지 내 토양 pH는 매우 낮게 나타났으며, 이는 이차사구의 수분 함량 분포와 역의 상관성을 보인다.

EC(전기전도도)는 토양 내 영양염류 함량을 나타내는 지표로, 무기염류가 증가할수록 전기전도도가 높아진다. 통상적으로 2.0dS/m 이상일 때 염류 집적으로 판단하며, 해안에서 내륙으로 갈수록 감소하는 경향이 있다. 신두리 해안사구의 평균 EC는 0.27dS/m이며, B-04 지점을 제외한 전 지점에서 0.2dS/m 이하로 나타나 염류 집적은 발생하지 않은 것으로 보인다. 다만 B-04 지점은 3.0dS/m 이상의 높은 값을 보여 상대적으로 다량의 염류가 집적된 것으로 판단된다. 이는 해당 지점이 사빈과 인접하여 사질조건대 및 연안의 영향을 직접적으로 받았기 때문으로 해석된다. 전체적으로 연구지역 퇴적물의 EC는 해안선으로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 경향을 보였다.

유기물은 토양의 질과 비옥도를 결정하는 중요 인자이자 인위적 교란에 민감한 지표이다. 유기물 함량은 일반적으로 사질 토양에서 낮고 니질 토양에서 높으며, 집적

된 유기물은 유기산을 형성하여 토양 산도에 영향을 준다. 신두리 해안사구의 평균 유기물 함량은 4.59g/kg이며, 지점별로 0.99~12.56g/kg의 범위를 보였다. 전사구 지대와 배후사구 삼림 지대에서 높은 함량이 관찰되었다. 전반적으로 유기물 함량은 전사구로부터 거리가 멀어질수록 감소하다가, 식생이 피복된 후사구 곰솔지역에서 다시 증가하는 경향을 보였다.

유효인산은 식물 생산성에 주된 영향을 미치는 인자이다. 신두리 해안사구의 평균 유효인산은 23.66mg/kg이며, 지점별로 10.50~69.84mg/kg의 분포를 보였다. 특히 D-07 지점은 타 지점 대비 상대적으로 높은 함량을 보인 반면, C-08과 H-08 지점은 낮게 나타났다. 전체적으로 유효인산의 뚜렷한 공간적 분포 특성은 관찰되지 않으나, 주로 후사구 내 곰솔군락지에서 낮은 값을 보이는 경향이 있다.

CEC(양이온치환용량) 토양 비옥도의 지표로서 토양이 보유할 수 있는 치환성 양이온(Ex.K, Ex.Ca, Ex.Na, Ex.Mg 등)의 총량을 의미한다. CEC 수치가 높을수록 양분 보유력이 강하며 토양 산성화를 완충하는 역할을 한다.

또한 토양 입자가 조립할수록 CEC 값이 높아지는 특성이 있다. 신두리 해안사구의 평균 CEC는 2.33 cmol+/kg이며, 지점별로 1.23~3.44 cmol+/kg의 범위를 보였다. 전반적으로 경작지와 인접한 사구지대에서 높은 값을, 북쪽 후사구지대에서 낮은 값을 나타냈다.

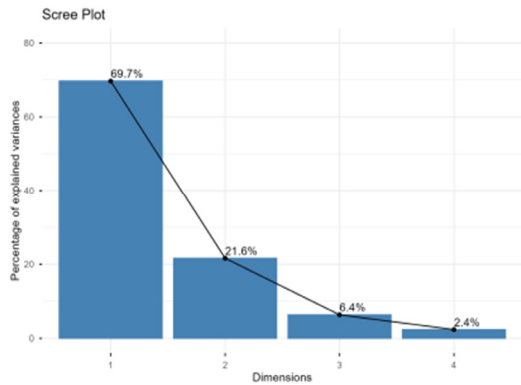
치환성 양이온 중 Ex.Na와 Ex.Mg은 해안 환경에서 주로 해수로부터 기원하며 강우의 화학적 특성에 지배적인 영향을 받는다(Carroll, 1962). 신두리 해안사구의 Ex.Na와 Ex.Mg 모두 해안선에 인접한 사빈 및 전사구 지대에서 농도가 높고, 내륙의 사구저지대 및 후사구로 갈수록 감소하는 경향을 보여 해수 염분의 영향이 거리에 따라 감소함을 시사한다. Ex.Ca는 주요 치환성 양이온 중 가장 높은 농도를 보이며 지역별 편차가 크다. 특히 조사 지역 북부에서 높은 농도를 보였는데, 이는 주변 지질뿐만 아니라 다량의 패각 혹은 패사의 유입 등 생태적 환경의 영향인 것으로 판단된다. Ex.K은 운모나 K-장석과 같은 조암광물의 풍화로 생성되나, 해안사구의 모래 입자는 자체적인 이온 공급 능력이 제한적이다. Ex.K 농도 분포는 공간적 변이가 크지 않으며, 유기물 함량의 분포와 유사한 양상을 보인다.

IV. 퇴적물 입도분석 기반 군집 분석

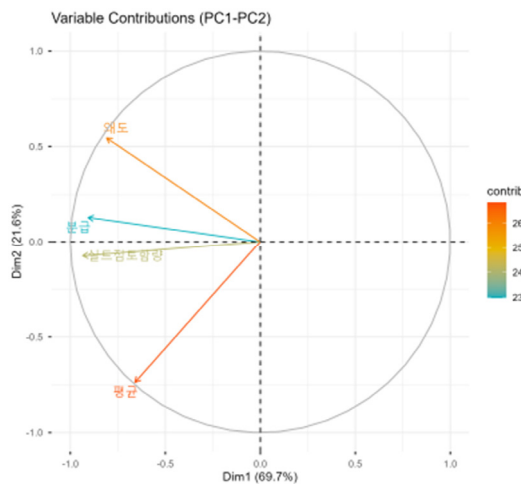
1. 주성분 분석(PCA) 결과

신두리 해안사구의 표층 퇴적물 입도 특성을 종합적으로 분석하기 위하여 평균입도, 분급도, 왜도, 실트·점토 함량의 4개 변수를 대상으로 주성분 분석(PCA)을 수행하였다. 분석 결과, 주성분 1(PC1)은 전체 분산의 69.7%를 차지하였고, 주성분 2(PC2)는 21.6%를 설명하여, 상위 두 개의 주성분이 전체 변동성의 91.3%를 포괄하는 것으로 나타났다(그림 4-(a)). 반면 주성분 3(PC3)과 주성분 4(PC4)는 각각 6.4%와 2.4%의 분산을 차지하여, 전체 입도 특성 변동에 대한 기여도가 상대적으로 제한적인 것으로 판단된다.

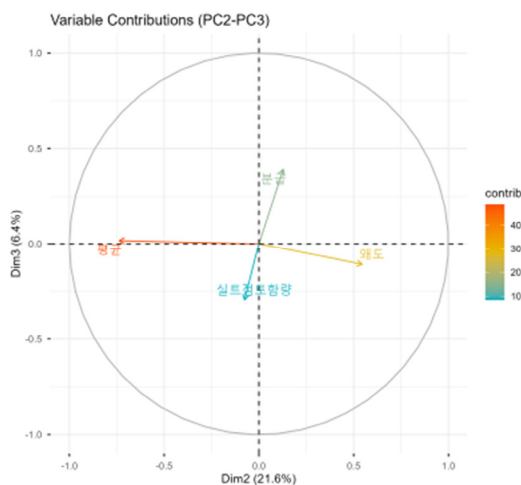
주성분 1(PC1)은 실트·점토 함량, 분급도, 왜도, 평균입도가 동일한 방향으로 높은 기여도를 보이는 성분으로 나타났다(그림 4-(b)). 이는 PC1이 세립 성분의 혼입 정도, 분급 상태 및 입도 분포의 비대칭성이 복합적으로 반영된 입도 특성 변동의 주요 축임을 의미한다. PC1의 양



(a) 주성분 분석의 고유값 분포



(b) PC1-PC2 변수 기여도



(c) PC2-PC3 변수 기여도

그림 4. PCA 분석 그래프

극단은 세립 성분 함량이 높고 분급이 불량한 혼합 퇴적물과 분급이 양호한 조립질 사질 퇴적물의 대비를 반영하며, 본 연구에서는 이를 신두리 해안사구 표층 퇴적물의 전반적인 조립-세립 연속체를 대표하는 축으로 해석하였다.

주성분 2(PC2)는 평균입도와 왜도가 상대적으로 높은 기여도를 보이며 구성되었다. PC2는 평균적인 입도 크기보다는 입도 분포의 비대칭성과 관련된 변동을 강조하는 보조적 축으로 해석되며, 동일한 입도 범위 내에서도 퇴적물 분포 형태의 차이를 구분하는 역할을 하는 것으로 판단된다. 주성분 3(PC3)은 분급도의 기여도가 두드러지게 나타났으며(그림 4-(c)), 이는 분급 특성이 PC1 및 PC2와는 독립적인 변동 축을 형성하고 있음을 시사한다. 다만 PC3과 PC4의 설명 분산은 각각 6.4%와 2.4로 상대적으로 낮아, 본 연구에서는 퇴적물 특성 분류의 주요 해석 기준으로는 활용하지 않았다.

이와 같은 PCA 결과는 신두리 해안사구의 표층 퇴적물 입도 특성이 단일 지표에 의해 지배되기보다는 세립 성분의 혼입, 분급 상태 및 입도 분포 형태가 상호 결합된 다차원적 특성 공간 내에서 변동하고 있음을 보여준다. 주성분 분석 결과는 입도 특성의 주요 변동이 소수의 주

성분 축에 의해 설명됨이 확인되었으며, 이는 표층 퇴적물 특성이 특정한 변동 구조를 가지고 있음을 의미한다. 이러한 주성분 공간에서 수행된 군집 분석은 무작위적 분류가 아닌, 입도 특성의 주요 변동 축을 반영한 결과로 해석될 수 있다.

2. 군집(Cluster) 분석

주성분 분석 결과를 바탕으로 k-means 군집 분석을 실시하여 신두리 해안사구 표층퇴적물의 입도 특성에 따른 공간적 분포 패턴을 파악하였다. 군집 수는 5개(k=5)로 설정하였으며, 각 계절별로 뚜렷한 군집 패턴이 나타났다(그림 5).

겨울철 퇴적물에서는 5개의 군집이 뚜렷하게 분리되었다(그림 5-(a), 표 6). 군집 1(n=23)은 평균입도 $2.03 \pm 0.08 \phi$, 분급도 1.15 ± 0.35 , 왜도 0.29 ± 0.07 , 실트+점토 함량 $5.93 \pm 1.56\%$ 의 특성을 보였다. 이 군집은 중간 정도의 분급을 가진 중립사~세립사로 구성되며, 약간의 실트 성분이 혼합된 특성을 나타낸다. 군집 2(n=7)는 평균입도 $1.95 \pm 0.04 \phi$, 분급도 3.11 ± 0.26 로 가장 분급이 불량한 특성을 보였으며, 실트+점토 함량은 $4.72 \pm 0.98\%$ 였

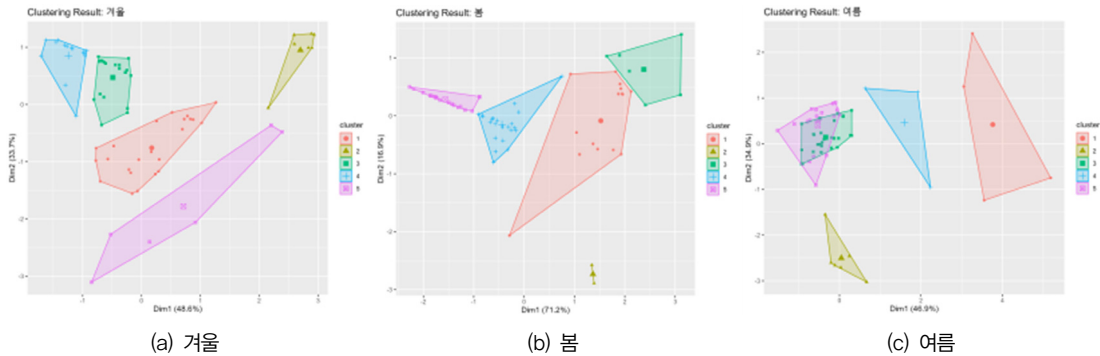


그림 5. 계절별 군집 분석 결과

표 6. 신두리 해안사구 겨울철 퇴적물 군집 분석 결과

군집 유형	개수	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	실트+점토 함량(%)
1	23	2.03 ± 0.08	1.15 ± 0.35	0.29 ± 0.07	5.93 ± 1.56
2	7	1.95 ± 0.04	3.11 ± 0.26	0.47 ± 0.02	4.72 ± 0.98
3	20	1.97 ± 0.05	0.44 ± 0.04	0.06 ± 0.05	0.75 ± 1.23
4	14	2.13 ± 0.07	0.41 ± 0.05	-0.10 ± 0.06	0.45 ± 1.19
5	6	2.37 ± 0.18	2.86 ± 0.79	0.44 ± 0.08	14.39 ± 2.29

다. 군집 3(n=20)은 평균입도 $1.97 \pm 0.05 \phi$, 분급도 0.44 ± 0.04 로 매우 양호한 분급 특성을 보였으며, 실트·점토 함량은 $0.75 \pm 1.23\%$ 로 가장 낮았다. 군집 4(n=14)는 평균입도 $2.13 \pm 0.07 \phi$, 분급도 0.41 ± 0.05 로 군집 3과 유사한 양호한 분급을 보였으나, 약간 더 세립한 특성을 나타내며 음의 왜도(-0.10 ± 0.06)를 보였다. 군집 5(n=6)는 평균입도 $2.37 \pm 0.18 \phi$ 로 가장 세립하고, 분급도 2.86 ± 0.79 로 매우 불량한 분급을 보였으며, 실트·점토 함량 $14.39 \pm 2.29\%$ 로 가장 높은 값을 나타냈다.

봄철 퇴적물에서도 5개의 군집이 확인되었으나, 각 군집의 시료 수와 공간 분포는 겨울철과 다소 차이를 보였다(그림 5-(b), 표 7). 군집 1(n=15)은 평균입도 $1.92 \pm 0.05 \phi$, 분급도 1.05 ± 0.35 로 중간 분급 특성을 보였다. 군집 2(n=2)는 가장 적은 시료 수를 보였으며, 평균입도 $1.97 \pm 0.06 \phi$, 분급도 3.16 ± 0.07 로 매우 불량한 분급 특성을 나타내었다. 군집 3(n=6)은 평균입도 $2.01 \pm 0.07 \phi$, 분급도 1.40 ± 0.28 이며, 실트·점토 함량 $10.56 \pm 2.03\%$ 로 높은 세립 성분 함량을 보였다. 군집 4(n=23)는 가장 많은 시료가 포함되었으며, 평균입도 $1.88 \pm 0.06 \phi$, 분급도 0.43 ± 0.05 로 양호한 분급을 보이는 중립사로 구성되었다. 군집 5(n=19)는 평균입도 $2.04 \pm 0.04 \phi$, 분급도 0.40 ± 0.01 로 매우 양호한 분급 특성을 보이는 세립사로 구성되었다.

여름철 퇴적물에서는 군집의 공간적 분포와 입도 특성이 다른 계절과 뚜렷한 차이를 보였다(그림 5-(c), 표 8).

군집 1(n=4)은 평균입도 $2.96 \pm 0.31 \phi$ 로 가장 세립하였으며, 분급도 4.63 ± 0.98 로 매우 불량한 분급을 보였다. 실트·점토 함량은 $22.05 \pm 4.43\%$ 로 전체 조사 기간 중 가장 높은 값을 나타내었다. 군집 2(n=6)는 평균입도 $1.98 \pm 0.06 \phi$, 분급도 3.24 ± 0.31 로 불량한 분급 특성을 보였다. 군집 3(n=28)은 가장 많은 시료가 포함되었으며, 평균입도 $2.01 \pm 0.10 \phi$, 분급도 0.46 ± 0.10 으로 양호한 분급을 보이는 세립사로 구성되었다. 군집 4(n=3)는 평균입도 $2.47 \pm 0.15 \phi$, 분급도 3.08 ± 1.21 이며, 실트·점토 함량 $16.09 \pm 1.95\%$ 로 높은 세립 성분을 포함하였다. 군집 5(n=20)는 평균입도 $2.02 \pm 0.09 \phi$, 분급도 0.98 ± 0.26 으로 중간 분급의 세립사로 구성되었다.

계절별 군집의 공간 분포를 비교한 결과, 뚜렷한 계절적 변동성이 확인되었다(그림 6). 겨울철과 봄철에는 비교적 유사한 군집 패턴이 나타났으나, 여름철에는 군집 분포가 크게 변화하였다. 특히 여름철에는 세립하고 분급이 불량한 군집(군집 1, 4)이 다수 분리되어 나타나, 겨울·봄철에 비해 세립질 혼합 퇴적물 유형의 공간적 분화가 보다 뚜렷해진 것으로 해석된다. 이는 여름철 강수 이후 사구저지대를 중심으로 일시적인 수분 집적 환경이 형성되며, 세립 입자의 부유와 잔류가 상대적으로 용이할 가능성이 있다. 또한, 식생 피복의 증가가 더해지면서 세립 입자의 재이동이 제한되어 세립하고 분급이 불량한 특성이 나타나는 것으로 판단된다.

양호한 분급을 보이는 사질 퇴적물로 구성된 군집(겨

표 7. 신두리 해안사구 봄철 퇴적물 군집 분석 결과

군집 유형	개수	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	실트+점토 함량(%)
1	15	1.92 ± 0.05	1.05 ± 0.35	0.38 ± 0.07	5.12 ± 1.06
2	2	1.97 ± 0.06	3.16 ± 0.07	0.48 ± 0.01	8.70 ± 0.81
3	6	2.01 ± 0.07	1.40 ± 0.28	0.39 ± 0.07	10.56 ± 2.03
4	23	1.88 ± 0.06	0.43 ± 0.05	0.10 ± 0.04	0.31 ± 0.85
5	19	2.04 ± 0.04	0.40 ± 0.01	-0.05 ± 0.06	0.11 ± 0.33

표 8. 신두리 해안사구 여름철 퇴적물 군집 분석 결과

군집 유형	개수	평균입도(ϕ)	분급(ϕ)	왜도	실트+점토 함량(%)
1	4	2.96 ± 0.31	4.63 ± 0.98	0.50 ± 0.15	22.05 ± 4.43
2	6	1.98 ± 0.06	3.24 ± 0.31	0.46 ± 0.04	5.24 ± 1.42
3	28	2.01 ± 0.10	0.46 ± 0.10	0.00 ± 0.08	1.80 ± 1.39
4	3	2.47 ± 0.15	3.08 ± 1.21	0.43 ± 0.08	16.09 ± 1.95
5	20	2.02 ± 0.09	0.98 ± 0.26	0.29 ± 0.07	5.92 ± 1.75

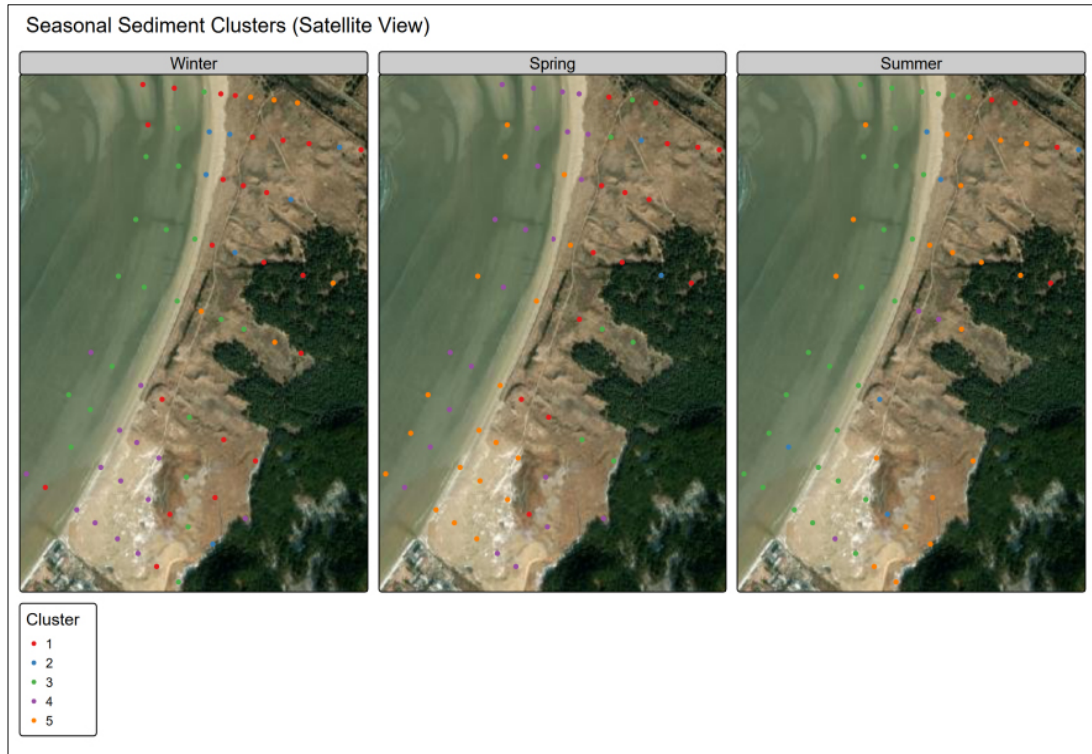


그림 6. 계절별 퇴적물 군집 분석 공간 분포

울철 군집 3, 4; 봄철 군집 4, 5; 여름철 군집 3)은 모든 계절에서 일관되게 나타났으나, 그 공간적 범위와 입도 특성에는 차이가 있었다. 이러한 군집들은 주로 활발한 풍성 작용을 받는 전사구(foredune) 및 배후사구 지역에 분포하며, 바람에 의한 선택적 운반과 퇴적 과정을 반영하는 것으로 해석된다.

IV. 고찰

신두리 해안사구지대의 표층 퇴적물 입도분석 결과, 연구 지역은 전반적으로 1.91 - 2.20 ϕ 범위의 중립사(medium sand)가 우세한 것으로 확인되었다. 계절별로는 봄철에 입도가 가장 조립하고 여름철에 세립화되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면, 지형 유형 간 평균 입도의 차이는 크지 않았으며, 사빈에서 배후 사구지대로의 점진적 세립화 역시 겨울철에만 약하게 관찰되었다. 퇴적상 분포 또한 해안선에서 내륙 방향으로 세립질 성분이 증가하는 경

향을 보였으나, 해변부터 후사구에 이르는 전 구간에서 급격한 입도 변화는 확인되지 않았다.

이러한 결과는 기존 연구와 부분적으로 일치하면서도 중요한 차이를 확인하였다. 신영호·서종철(2014)은 겨울철 입도가 여름철보다 조립하며, 해변에서 내륙으로 갈수록 세립화가 뚜렷하다고 보고한 바 있다. 또한 일반적인 해안사구 이론에서는 사구 퇴적물이 사빈에 비해 상대적으로 세립한 것으로 설명된다. 그러나 본 연구에서는 여름철에 가장 세립한 입도 특성이 나타났을 뿐 아니라, 사빈과 사구 간 입도 차이가 미미하게 확인되었다. 따라서 신두리 해안사구의 퇴적 환경이 단순한 해변-사구 계통의 일방향적 퇴적 모델로 설명되기 어려운 복합적이고 역동적인 특성을 지니고 있음을 시사한다.

주성분 분석(PCA)과 k-means 군집 분석을 통해 표층 퇴적물의 입도 특성을 정량적으로 분류한 결과, 소수의 주요 퇴적 요인에 의해 지배되는 명확한 군집 구조가 확인되었다. PCA 결과, PC1과 PC2가 전체 분산의 91.3%를 설명하였으며, PC1은 실트·점토 함량, 분급도, 왜도, 평

균입도의 영향을 받아 조립·양호 분급 사질 퇴적물과 세립·불량 분급 혼합 퇴적물을 구분하는 축으로 해석되었다. PC2는 평균입도와 왜도의 기여가 커, 입도 조립·세립 특성과 분포 비대칭성을 반영하는 축으로 나타났다.

k-means 군집 분석 결과, 신두리 해안사구의 퇴적물은 크게 양호한 분급의 순수 사질 퇴적물 군집, 중간 분급의 혼합 퇴적물 군집, 불량한 분급의 세립질 혼합 퇴적물 군집으로 구분되었다. 이들 군집은 분급도, 실트·점토 함량 및 평균입도에서 뚜렷한 차이를 보였으며, 공간적으로도 상이한 분포 양상을 나타냈다. 양호한 분급의 사질 퇴적물 군집은 전사구 및 배후사구 능선부에 주로 분포하여 활발한 풍성 작용을 반영하는 반면, 불량한 분급의 세립질 군집은 사구저지대와 식생 발달 지역에 집중되어 바람의 영향이 상대적으로 약한 환경을 지시한다.

특히, 군집 간 평균입도의 차이가 1.88 - 2.96 ϕ 범위로 비교적 작게 나타났다. 이는 사빈에서 배후 사구로의 퇴적물 이동이 급격한 불연속 없이 연속적으로 이루어지고 있음을 의미한다. 이러한 군집 구조는 신두리 해안사구에서 사빈-사구 간 퇴적물 교환이 매우 활발하게 이루어지고 있으며, 명확한 퇴적 환경 경계가 형성되지 않음을 입증한다.

군집 분석 결과에서 나타난 계절별 분포 차이는 신두리 해안사구의 퇴적 환경이 기존 연구에서 제시된 것보다 역동적인 시스템을 보여준다. 여름철에는 세립하고 분급이 불량한 군집다수 분리되어 나타났으며, 이는 여름철 강수 이후 사구저지대를 중심으로 수분 집적 환경이 형성되고 식생 피복이 증가하면서, 세립 입자의 부유와 잔류가 용이해져 분급이 불량한 퇴적물 특성이 강화된 것으로 판단된다. 반면 겨울철과 봄철에는 양호한 분급의 사질 퇴적물 군집이 우세하게 나타나, 강한 계절풍에 의한 퇴적물 재이동과 재분급이 활발했음을 시사한다.

이러한 결과는 신영호·서종철(2014)이 제시한 겨울철 조립화 경향과 부분적으로 상반되며, 신두리 해안사구의 퇴적 환경이 시기와 조건에 따라 변화하고 있음을 보여준다. 또한 통상적인 해안사구 이론(Pye and Tsoar, 2008)에서 설명하는 사빈-사구 간 명확한 입도 대비가 본 연구에서는 확인되지 않았는데, 이는 서해안 특유의 넓은 조건대 발달, 강한 계절풍, 배후 산지로부터의 세립 물질 공급이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 이러한 요인들의 상호작용으로 신두리 해안사구는 사빈-사구 경계가 모호하고, 계절별 입도 변동이 크며, 다양한 퇴적

환경이 공존하는 특수한 해안사구 시스템을 형성하고 있다.

V. 결론

신두리 해안사구는 단순한 경관적 자산을 넘어 해수면 상승과 자연재해에 대응하는 생태적 완충 지대로서 중요한 기능을 수행하고 있으며, 그 보존 가치는 매우 크다. 그러나 최근 자연적 요인과 인위적 개발 압력이 복합적으로 작용하면서 사구 지대의 퇴적 환경은 점차 변화하고 있다. 본 연구는 이러한 변화 양상을 표층 퇴적물 분석을 통해 정량적으로 규명하고, 신두리 해안사구의 최근 침·퇴적 환경 특성을 종합적으로 이해하고자 수행되었다.

퇴적물 입도분석 결과, 신두리 해안사구에서는 봄철 조립화-여름철 세립화라는 뚜렷한 계절적 경향성이 확인되었다. 공간적으로는 해안에서 내륙으로 갈수록 입도가 세립해지는 경향이 겨울철에 상대적으로 두드러졌으나, 기존 연구에서 일반적으로 제시되는 사빈과 배후사구 간의 명확한 입도 대비는 본 연구 지역에서는 제한적으로 나타났다. 이러한 결과는 신두리 해안사구에서 퇴적물의 이동과 혼합이 단순한 일방향 구조가 아니라, 보다 복합적인 교환 과정을 통해 이루어지고 있음을 시사한다.

이화학적 분석 결과, 치환성 나트륨과 마그네슘 등 해수 기원의 양이온 농도는 해안선과의 거리에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 이는 해수 영향이 퇴적 환경뿐 아니라 토양 화학성에도 직접적으로 반영되고 있음을 보여준다. 이러한 화학적 특성의 공간적 변화는 사구 지형 내 퇴적 환경의 미세한 차이를 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다.

주성분 분석(PCA) 결과, PC1과 PC2는 전체 분산의 91.3%를 설명하며 표층 퇴적물 입도 특성의 주요 변동 축으로 작용하였다. PC1은 실트·점토 함량, 분급도, 왜도 및 평균입도의 복합적 영향을 반영하여 조립·양호 분급 사질 퇴적물과 세립·불량 분급 혼합 퇴적물을 구분하는 축으로 해석되었다. k-means 군집 분석을 통해 도출된 퇴적물 군집은 입도 특성에 따라 몇 개의 유형으로 구분되었으며, 이들 군집은 지형 조건과 계절에 따라 상이한 공간 분포를 나타냈다.

계절별 군집 분포를 비교한 결과, 겨울철과 봄철에는

양호한 분급의 사질 퇴적물 군집이 우세한 반면, 여름철에는 세립하고 분급이 불량한 군집이 다수 분리되는 경향이 나타났다. 이는 여름철 강수 이후 사구저지대를 중심으로 수분 집적 환경이 형성되고 식생 피복이 증가하면서, 세립 입자의 부유와 잔류가 용이해져 분급이 불량한 퇴적물 특성이 강화된 것으로 판단된다. 동시에 모든 계절에서 양호한 분급의 사질 퇴적물 군집이 지속적으로 관찰된 점은, 신두리 해안사구에서 사빈-사구 간 퇴적물 교환과 재분급 과정이 상시적으로 이루어지고 있음을 보여준다.

종합하면, 신두리 해안사구의 표층 퇴적 환경은 단순한 해변-사구 이분법적 모델로 설명되기보다는, 계절적 변동성과 지형적 조건이 상호작용하는 연속적이고 역동적인 시스템으로 이해되어야 한다. 본 연구는 표층 퇴적물의 입도 및 이화학적 특성을 기반으로 이러한 퇴적 환경의 복합성을 실증적으로 제시하였다는 점에서 의의를 가진다. 향후에는 장기 시계열 자료의 축적과 통계적 유의성 검정을 병행하고, 퇴적물 특성과 생태·지형 요소 간의 정량적 관계를 통합적으로 분석함으로써 해안사구 시스템의 동역학적 메커니즘을 보다 심층적으로 규명할 필요가 있을 것이다.

참고문헌

강대균, 2006, “천연기념물 신두리 해안사구의 지형과 식생,” 한국지형학회지, 13(3), 35-44.
 농촌진흥청 농업과학기술원, 2000, 「토양 및 식물체 분석법」, 수원, 농업과학기술원.
 류완상, 2002, “해안사구의 바람과 비사에 관한 연구: 서해안 신두리를 사례로,” 지리학논총, 40, 93-118.
 박동원·유근배, 1979, “우리나라 서해안의 사구 지형,” 지리학논총, 16, 1-10.
 서종철, 2001, “서해안 신두리 해안사구의 지형변화와 퇴적물 수지,” 서울대학교 대학원 박사학위논문.
 서종철, 2002, “원격탐사와 GIS 기법을 이용한 신두리 해안사구지대의 지형변화 분석,” 대한지리학회지(지역과 지리), 8(1), 98-109.
 송영선, 2021, “자연관광자원 관리를 위한 드론매핑시스템의 활용: 신두리 해안사구를 중심으로,” 관광레저연구, 33(9), 67-82.

신영호·서종철, 2014, “신두 해양생태계보호구역 해변과 조하대의 퇴적물 특성,” 대한지리학회지, 49(6), 812-832.
 신영호·이현아·유근배, 2015, “방사림이 조성된 병술안 해안사구 퇴적물의 지화학적 단순성,” 대한지리학회지, 50(4), 375-391.
 유근배·류호상·김성환, 2005, “비사를 통해 신두 사구지대로 유입되는 주요 양이온의 규모와 공간적 패턴 분석,” 지리학논총, 45, 165-183.
 유근배·신영호·김대현·김성환, 2012, “신두해안사구지대로 유입되는 영양염류의 시공간적 특성,” 대한지리학회지, 47(2), 193-207.
 정근비·서종철·장동호, 2025, “DEM을 활용한 해안사구 중단기 퇴적환경 변화 탐지: 신두리 해안사구를 중심으로,” 한국지리학회지, 14(3), 329-339.
 한국동력자원연구소, 1982, 「지질도폭설명서: 대산·이곡」, 대전: 한국동력자원연구소.
 Abuodha, J. O. Z., 2003, Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya, *Journal of African Earth Sciences*, 36, 41-54.
 Bauer, B. O., Hesp, P., Smyth, T. A. G., Walker, I. J., Davidson-Arnott, R. G. D., Pickart, A., Grilliot, M., and Rader, A., 2022, Air flow and sediment transport dynamics on a foredune with contrasting vegetation cover, *Earth Surface Processes and Landforms*, 47, 2811-2829.
 Carroll, D., 1962, *Rainwater as a chemical agent of geologic processes: A review*, Water Supply paper 1535-G, U.S. Geological Survey.
 Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957, Brazos River Bar: A Study in the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1), 3-26.
 Hesp, P., 2002, Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics, *Geomorphology*, 48(1-3), 245-268.
 Hesp, P., Walker, I. J., Chapman, C., Davidson-Arnott, R., and Bauer, B. O., 2013, Aeolian dynamics over a coastal foredune, Prince Edward Island, Canada, *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(13), 1566-1575.
 Kasper-Zubillaga, J. J., Zolezzi-Ruíz, H., Carranza-Edwards,

A., Girón-García, P., Ortiz-Zamora, G., and Palma, M., 2007, Sedimentological, modal analysis and geochemical studies of desert and coastal dunes, Altar Desert, NW Mexico, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 489-508.

Pye, K. and Tsoar, H., 2008, *Aeolian Sand and Sand Dunes*, Springer.

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: 2026년 1월 25일

심사완료일: 2026년 2월 10일

게재확정일: 2026년 2월 11일