Check for updates

한국해양환경·에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 29, No. 2, 211-218, May 2026

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2026.29.2.211
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

대한민국 연안 해안쓰레기 축적의 공간적 불균질성 및 거동 해석

윤동협†
중소조선연구원 조선해양기술협력본부 책임연구원

Spatial Heterogeneity and Behavioral Analysis of Coastal Marine Debris Accumulation along the Korean Coast

Donghyup Youn†
Senior Researcher, Shipbuilding & Offshore Technology Cooperation Division, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Busan 46757, Korea

요 약

대한민국은 동해, 남해, 서해의 3면이 바다로 둘러싸여 있으며, 각 해역은 서로 다른 해양환경 특성을 가진다. 이러한 차이는 해안쓰레기의 이동 및 축적 양상에 영향을 미친다. 본 연구에서는 국가 해안쓰레기 모니터링 정점 자료를 활용하여 해안쓰레기의 유입, 이동 및 축적 특성을 공학적 관점에서 분석하였다. 정점별 관측 자료를 기반으로 평균 축적량, 발생 빈도, 최대값 및 변동성을 종합한 축적 특성 지수를 정의하고, 이를 통해 공간적 분포와 시간적 특성을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 해안쓰레기 축적은 뚜렷한 공간적 불균질성을 보였으며, 권역별로 서로 다른 분포 특성이 나타났다. 또한 발생 빈도와 변동성의 관계를 통해 축적 특성이 유형별로 구분됨을 확인하였다. 이러한 결과는 해안쓰레기 축적이 연안에서의 물리적 수송 과정과 해안선 형상에 의해 결정되는 현상임을 보여준다. 본 연구는 해안쓰레기 거동을 정량적으로 해석한 사례로서, 향후 연안 환경 관리에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – The Korean Peninsula is surrounded by the East Sea, South Sea, and West Sea, each exhibiting distinct oceanographic conditions. These differences significantly influence the transport and accumulation patterns of coastal marine debris. This study analyzes the inflow, transport, and accumulation characteristics of marine debris using national coastal monitoring station data. An Accumulation Index (AI) was defined by integrating mean accumulation, occurrence frequency, maximum value, and variability, and was used to quantitatively evaluate the spatial distribution and temporal characteristics of debris accumulation. The results show that marine debris accumulation exhibits clear spatial heterogeneity, with distinct regional differences among the three coastal areas. The relationship between occurrence frequency and variability further indicates that accumulation patterns can be classified into different types. These findings suggest that marine debris accumulation is governed by coastal physical transport processes and shoreline geometry rather than simply by input magnitude. This study provides a quantitative interpretation of marine debris behavior and provides a fundamental framework for future coastal environmental management.

Keywords: Coastal marine debris(해안쓰레기), Accumulation index(축적 특성 지수), Spatial heterogeneity(공간적 불균질성), Coastal physical processes(연안 물리과정), Accumulation behavior(축적 거동)

1. 서 론

해양쓰레기는 육상 및 해상 활동에서 발생하여 해양으로 유입된 이후, 파랑, 해류 및 조석과 같은 연안 물리과정에 의해 이동하며 해안에 축적되는 특성을 가진다. 이러한 과정은 일반적으로 유입, 이동, 축적의 단계로 구분될 수 있으며, 해안에서 관측되는 쓰레기 분포는 이들 과정이 복합적으로 작용한 결과로 이해할 수 있다. 특히 해양쓰레기의 이동은 바람, 해류 및 조류 등의 영향을 크게 받으며, 이러한 물리적 요인의 변화에 따라 이동 경로와 축적 양상이 달라지는 것으로 보고되고 있다(Kim *et al.*[2019]). 또한 해안에서의 축적은 해수 유동과 연안 환경 조건에 의해 결정되는 결과로, 주변 해류 이동과 밀접한 관련을 가지는 것으로 알려져 있다(Kim *et*

†Corresponding author: dhyoun@rims.re.kr

al.[2024]; Sim[2026]).

기존의 해양쓰레기 관련 연구는 주로 발생량 추정, 유입 경로 분석 및 환경적 영향 평가 등에 초점을 맞추어 수행되어 왔다. 특히 해양쓰레기의 주요 발생원과 유입 경로를 규명하기 위한 연구가 활발히 이루어졌으며, 하천 및 육상 기원을 중심으로 연안 유입 특성을 분석하는 연구들이 수행된 바 있다(Kang *et al.*[2025]). 또한 해양생물에 대한 영향, 생태계 교란 등 환경적 측면에서의 영향 평가 역시 주요 연구 분야로 다루어져 왔다(Lopez[2021]). 그러나 이러한 연구들은 해양쓰레기의 규모와 특성을 파악하는 데 기여하였음에도 불구하고, 해안에서 관측되는 쓰레기 분포를 연안 물리과정과 연계하여 해석하는 공학적 접근은 상대적으로 부족한 실정이다. 특히 해안쓰레기의 축적 특성을 정량적으로 해석하거나 시간적 변동성과 공간적 분포를 통합적으로 분석한 연구는 제한적으로 이루어져 왔으며, 를 기반으로 효과적인 회수 및 관리 전략과 연계한 연구 역시 충분히 이루어지지 못하고 있다. 한편, 해안쓰레기는 지속적인 제거와 관리가 요구되는 해양환경 문제로서, 체계적인 관리 및 회수 전략의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다(Lee *et al.*[2024]; Morishige[2010]).

연안에서의 해양쓰레기 축적은 단순한 환경 현상이 아니라, 파랑 및 연안류와 같은 수리역학적 요인과 해안선 형상 및 지형적 조건이 상호작용한 결과로 볼 수 있다. 해양쓰레기는 해류, 바람 및 파랑과 같은 물리적 외력에 의해 이동하며, 이러한 수리역학적 요인이 이동 경로를 결정하는 주요 인자로 작용한다(Lebreton *et al.*[2012]). 또한 동일한 유입 조건 하에서도 해안의 형상, 인접 구조물 및 수심 분포 등에 따라 쓰레기의 이동 경로와 체류 특성이 달라지며, 그 결과 특정 해역에서는 지속적 또는 반복적인 축적이 발생하게 된다([Critchell and Lambrechts[2016]). 이러한 축적 양상은 무작위적인 현상이 아니라, 연안에서의 물리적 수송 및 축적 과정에 의해 형성된 공간적 패턴으로 해석될 수 있으며 해안쓰레기 분포는 연안 물리과정의 결과로 이해하는 것이 타당하다(National[2021]).

우리나라에서는 국가 차원의 해안쓰레기 모니터링 체계를 통해 동해, 남해, 서해 연안에 분포된 다수의 정점에서 해안쓰레기 현황을 지속적으로 관측하고 있다(Seo[2019]). 이러한 모니터링은 일정한 기준과 조사 방법에 따라 동일 정점에서 반복적으로 수행되는 장기 관측 체계로서, 표준화된 방법에 기반한 자료를 제공한다(Jang *et al.*[2012]; Kim[2019]; Woo and Kim[2022]). 또한 모니터링 정점은 전국 연안을 따라 공간적으로 분포되어 있어, 해안쓰레기의 공간적 분포 특성을 분석하는 데 유용한 기반을 제공한다(Han *et al.*[2023]). 특히 정점별 관측 결과는 반복 조사에 기반하여 축적되므로, 특정 해역에서의 축적 정도뿐만 아니라 시간에 따른 반복성 및 변동성을 동시에 파악할 수 있으며 이는 해안쓰레기 거동을 공학적으로 해석하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있다(Do and Yoon[2024]).

본 연구에서는 국가 해안쓰레기 모니터링 정점 자료를 활용하여 연안 해안쓰레기의 유입, 이동, 축적 특성을 공학적 관점에서 분석하고자 한다. 특히 각 정점에서 관측된 축적 결과를 기반으로 해안쓰레기의 공간적 분포와 반복적 축적 특성을 도출하고, 이를 통해 해안쓰레기 회수를 위한 잠재적 거점으로 활용 가능한 해역의 특성을 검토한다. 이를 위해 동해, 남해, 서해 연안을 대상으로 정점별 평균 축적량, 발생 빈도 및 변동성을 분석하고, 권역별 특성을 비교함으로써 전국 연안에서의 해안쓰레기 거동을 종합적으로 해석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 국가 해안쓰레기 모니터링 정점 자료 및 분석 범위

본 연구에서는 해양수산부에서 수행하는 국가 해안쓰레기 모니터링 정점 자료를 활용하였다(Public[2026a]; Public[2026b]). 해당 자료는 동해, 남해, 서해 연안을 따라 분포된 다수의 정점에서 동일한 조사 방법과 기준에 따라 반복적으로 수집된 데이터로, 해안쓰레기의 발생 현황을 정량적으로 파악할 수 있는 대표적인 장기 관측 자료이다. 분석 기간은 2023년부터 2024년까지의 자료로 설정하였다. 이는 최근의 해안쓰레기 발생 및 축적 특성을 반영할 수 있는 기간임과 동시에, 2025년 자료의 경우 일부 정점에서 데이터가 완전히 구축되지 않아 정점 간 비교의 일관성을 확보하기 어려운 점을 고려한 것이다. 해당 기간 동안 총 61개의 정점 자료가 구축되어 있으며, 본 연구에서는 이들 전체 정점을 분석 대상으로 사용하였다. 각 정점은 일정한 조사 주기에 따라 반복적으로 관측된 자료로, 정점당 평균 관측 횟수는 약 6회 수준으로 나타났다. 또한 각 정점에서는 수거된 해안쓰레기의 개수, 무게 및 부피 등의 정보가 체계적으로 기록되며, 본 연구에서는 해안쓰레기 축적 특성을 대표하는 변수로 개수를 주요 분석 변수로 사용하였다. 결측값이 포함된 관측 자료는 별도의 보간을 수행하지 않고 해당 시점의 데이터를 제외한 후, 유효한 관측값만을 이용하여 각 정점의 통계량을 산정하였다. 이를 통해 데이터의 일관성을 유지하면서도 분석 결과의 왜곡을 최소화하고자 하였다. 이와 같은 정점 기반 자료는 특정 시점의 단일 관측값에 국한되지 않고, 동일 정점에서 반복적으로 축적된 관측 결과를 포함하고 있어 해안쓰레기의 시간적 변동성과 공간적 분포 특성을 동시에 분석할 수 있다는 장점을 가진다. Fig. 1은 해양수산부에서 제공하는 모니터링 정점의 위치를 나타낸 것이다.

해안쓰레기 축적 특성의 공간적 차이를 분석하기 위하여, 연구 대상 정점을 동해, 남해, 서해의 세 권역으로 구분하였다. 권역별로는 동해 12개, 남해 21개, 서해 28개의 정점이 포함된다. 각 권역은 해양환경 및 수리역학적 특성에서 차이를 가지며, 동해는 상대적으로 개방형 해역으로서 파랑의 영향이 큰 특징을 가지는 반면, 남해는 다도해 형태의 복잡한 해안선으로 인해 국지적인 체류 및 축적 가능성이 높은 해역이다. 서해는 조차가 크고 조석 및 연안류의 영향이 지배적인 해역으로, 해안쓰레기의 이동 및 재분포 특성이 다른 권역과 구별되는 특징을 가진다(Kim[2023]).

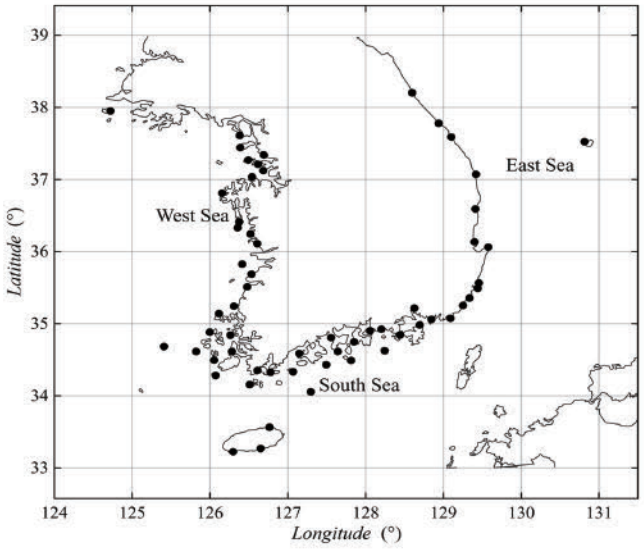

Fig. 1. Locations of coastal marine debris monitoring stations along the Korean coast.

2.2 분석 지표

해안쓰레기의 축적 특성을 정량적으로 평가하기 위하여, 본 연구에서는 평균 축적량, 발생 빈도, 최대값 및 변동성 지표를 활용하였다.

평균 축적량은 각 정점에서 관측된 해안쓰레기의 평균 개수를 산정하여, 해당 정점의 장기적인 축적 수준을 평가하기 위한 지표로 정의하였다. 무게 자료는 보조적 참고 지표로 활용하였다. 발생 빈도는 분석 기간 동안 특정 정점에서 해안쓰레기가 관측된 횟수를 기준으로 산정하였으며, 반복적인 유입 및 축적 여부를 판단하기 위한 지표로 활용하였다. 최대값은 각 정점에서 관측된 해안쓰레기의 최대 개수 및 최대 무게를 산정하여, 특정 시점에서의 집중적 축적 또는 이벤트성 유입 가능성을 평가하기 위한 지표로 정의하였다. 변동성은 동일 정점에서의 관측값에 대해 표준편차 및 변동계수를 이용하여 산정하였으며, 해안쓰레기 축적의 안정성 또는 외력에 의한 변동 특성을 평가하기 위한 지표로 활용하였다. 이러한 지표들은 각각 해안쓰레기의 장기 축적 수준, 반복성, 극값 특성 및 변동성을 반영하며, 이를 통해 해안쓰레기의 유입, 이동 및 축적 과정에서 나타나는 축적 거동을 종합적으로 평가하고자 하였다. 각 분석 지표의 정의와 산정 방법은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Definition and calculation of metrics used for evaluating coastal marine debris accumulation

No.	Metric	Definition	Calculation method
1	Mean Accumulation	Average number and weight of marine debris observed at each station	$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$ (1)
2	Occurrence Frequency	Number of times marine debris is observed during the analysis period	$f = \frac{N_{obs}}{N_{total}}$ (2)
3	Maximum Value	Maximum number and weight of marine debris observed at a station	$X_{max} = \max(X_i)$ (3)
4	Variability	Degree of variation in observed values	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$ (4)

여기서 $\bar{X}$ = i번째 관측값

n = 전체 관측 횟수

N_{obs} = 해안쓰레기가 관측된 횟수

N_{total} = 전체 조사 횟수

X_{max} = 관측값 중 최대값

σ = 표준편차

CV = 변동계수

2.3 정점 기반 축적 특성 해석 방법

국가 해안쓰레기 모니터링 정점을 해안쓰레기 축적 결과를 반영하는 관측 지점으로 간주하고, 각 정점에서 관측된 자료를 기반으로 해안쓰레기의 축적 특성을 정량적으로 평가하였다. 해안쓰레기 모니터링 정점에서 관측되는 축적량은 연안으로의 유입과 근연안 이동 과정이 결합된 결과로 해석될 수 있으므로, 개별 정점을 별도의 축적 거점으로 정의하기보다는 각 정점에서 나타나는 축적 특성을 정량적으로 비교하여 공간적 분포 특성을 분석하였다. 정점 간 축적 특성의 상대적 비교를 위하여, 각 분석 지표에 대해 최소–최대 정규화를 적용하였다.

$$X_i' = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

여기서 X_i' = 정규화된 값

X_{min} = 관측값 중 최소값

최소–최대 정규화는 데이터의 전체 범위를 0과 1 사이로 변환하여 정점 간 상대적 비교를 용이하게 하는 장점이 있으나, 극단값에 민감하게 반응할 수 있는 한계를 가진다. 특히 일부 정점에서 비정상적으로 큰 값이 존재할 경우, 전체 정점의 정규화 값 분포가 왜곡될 가능성이 있다. 정규화 적용에 앞서 각 지표(평균 축적량, 발생 빈도, 최대값, 변동계수)에 대해 이상값 검출을 수행하였다. 이상값 검출은 사분위 범위 방법을 이용하여 수행하였으며, 각 지표에 대해 다음 조건을 만족하는 값을 이상값으로 정의하였다.

$$X < Q_1 - 1.5 \times IQR \text{ or } X > Q_3 + 1.5 \times IQR \quad (6)$$

여기서 Q_1 = 1사분위수

Q_3 = 3사분위수

IQR = $Q_3 - Q_1$

검출 결과 일부 정점에서 상한 범위를 초과하는 값이 확인되었으나 오류에 의한 이상치라기보다는 특정 시점에서의 집중적 해안쓰레기 유입에 의해 발생한 실제 관측값으로 판단되었다. 또한 이상값의 개수는 전체 정점 대비 제한적인 수준으로 나타났다. 추가적으로 극단값의 영향도를 평가하기 위해, 상위 이상값을 제외한 조건에서 최소–최대 정규화를 수행하는 보조 분석을 실시하였다. 그 결과 주요 고축적 정점의 공간적 분포 및 상대적 순위에는 큰 변화가 나타나지 않았다.

정규화된 지표들을 종합하여 각 정점의 축적 특성을 정량적으로 평가하기 위해 축적 특성 지수(Accumulation Index, AI)를 다음과 같이 정의하였다.

$$AI = w_1\bar{X}' + w_2 f' + w_3 X'_{max} + w_4 S' \quad (7)$$

$$S' = 1 - CV' \quad (8)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1 \quad (9)$$

여기서 $\bar{X}'$ = 정규화된 평균 축적량
f' = 정규화된 평균 발생 빈도
X'_{max} = 정규화된 평균 최대값
CV' = 정규화된 변동계수
S' = 변동성이 낮을수록 높은 값을 갖도록 정의된 안정성
w_i = 각 지표의 가중치

본 연구에서 정의된 축적 특성 지수는 서로 다른 물리적 의미를 가지는 지표들을 통합하여 해안쓰레기 축적 특성을 종합적으로 평가하기 위한 지수이다. 평균 축적량은 장기적인 축적 수준을, 발생 빈도는 반복적 유입 특성을, 최대값은 이벤트성 축적을, 그리고 안정성 지표는 시간적 변동 특성을 각각 반영한다. 이러한 지표들은 축적 현상의 상이한 측면을 나타내므로 특정 지표의 상대적 중요도를 사전에 객관적으로 규정하기 어렵다. 이에 따라 본 연구에서는 특정 지표에 대한 주관적 가중치 설정에 따른 편향을 최소화하기 위하여, 모든 지표에 동일 가중치(w_i = 0.25)를 적용한 기준 시나리오(S0)를 설정하였다. 동일 가중치는 최적 가중치를 의미하는 것이 아니라, 각 지표가 동등한 중요도를 가진다는 가정 하에 정점 간 상대적 축적 특성을 비교하기 위한 기준 조건으로 사용되었다. 다만 각 지표의 물리적 의미와 스케일이 상이하다는 점을 고려하여, 가중치 설정이 AI 산정 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해 가중치 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 동일 가중치 조건(S0)과 함께 각 지표를 개별적으로 강조하는 시나리오(S1-S4)를 설정하였으며, 각 시나리오의 가중치 구성은 Table 2에 제시하였다.

각 가중치 시나리오에서 산정된 축적 특성 지수를 기반으로 상위 축적 정점의 일관성을 정량적으로 비교하기 위해, 상위 정점 일치율과 순위 상관성을 함께 평가하였다. 상위 축적 정점은 전체 정점 중 상위 p = 0.20에 해당하는 정점으로 정의하였으며, 상위 정점의 개수는 다음과 같이 산정하였다.

$$N_{top} = [p \cdot N] \quad (10)$$

여기서 N은 전체 정점의 수를 의미한다.

각 시나리오에서 도출된 상위 정점 집합을 T_s로 정의하고, 기준 시나리오(S0)의 상위 정점 집합 T_0로 정의하였다. 두 집합 간의 일치율 O_s는 다음과 같이 계산하였다.

$$O_s = \frac{|T_0 \cap T_s|}{|T_0|} \quad (11)$$

또한 가중치 변화에 따른 전체 순위 구조의 변화를 평가하기 위해, 각 시나리오의 AI 순위와 기준 시나리오(S0)의 순위 간 Spearman 순위상관계수(Spearman's, ρ)를 다음과 같이 산정하였다.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{N} d_i^2}{N(N^2-1)} \quad (12)$$

여기서 d_i는 동일 정점에 대한 두 시나리오 간 순위 차이를 의미한다.

민감도 분석 결과, Table 3과 같이 기준 시나리오(S0)와 각 가중치 시나리오(S1~S4) 간 상위 축적 정점의 일치율은 75.0~83.3% 범위로 나타났으며, 전체 정점 순위에 대한 Spearman 순위상관계수는 0.959~0.988의 높은 값을 보였다.

이는 특정 지표의 가중치를 변화시키더라도 전체적인 AI 순위 구조와 주요 고축적 정점의 식별 결과가 크게 변하지 않음을 의미한다. 특히 평균 축적량(S1), 발생 빈도(S2) 및 안정성(S4)을 강조한 경우에는 상위 정점의 일치율이 83.3%로 나타나 기준 시나리오와 높은 일관성을 보였다. 반면 최대값을 강조한 S3 시나리오에서는 일치율이 75.0%로 다소 낮게 나타났으며, 이는 이벤트성 고축적 정점이 일부 순위 변동에 영향을 미친 결과로 해석된다. 따라서 축적 특성 지수는 특정 단일 지표에 의해 지배되지 않고, 평균 축적량, 발생 빈도, 최대값 및 안정성 지표가 복합적으로 작용하여 결정되는 것으로 판단된다. 이에 따라 동일 가중치를 적용한 기준 시나리오(S0)는 특정 지표에 대한 과도한 편향 없이 해안쓰레기 축적 특성을 종합적으로 평가하기 위한 합리적인 기준으로 사용될 수 있다.

3. 결 과

3.1 축적 특성 지수의 공간 분포 및 권역별 특성

전국 해안쓰레기 모니터링 정점에서 산출된 축적 특성 지수(AI)는 0.00에서 0.80에 이르는 넓은 범위를 보이며, 해안쓰레기 축적의 뚜렷한 공간적 불균질성을 나타냈다. 일부 정점에서는 AI 값이 상대

Table 2. Weighting scenarios for sensitivity analysis of the Accumulation Index (AI)

Scenario	w_1 (Mean)	w_2 (Freq.)	w_3 (Max.)	w_4 (Stability)	Description
S0	0.25	0.25	0.25	0.25	Baseline (equal weighting)
S1	0.40	0.20	0.20	0.20	Emphasis on mean accumulatio
S2	0.20	0.40	0.20	0.20	Emphasis on occurrence frequency
S3	0.20	0.20	0.40	0.20	Emphasis on maximum value
S4	0.20	0.20	0.20	0.40	Emphasis on stability

Table 3. Sensitivity analysis results for weighting scenarios

Scenario	Overlap with S0	Overlap Ratio (%)	Spearman's ρ
S1	10/12	83.3	0.988
S2	10/12	83.3	0.959
S3	9/12	75.0	0.974
S4	10/12	83.3	0.966

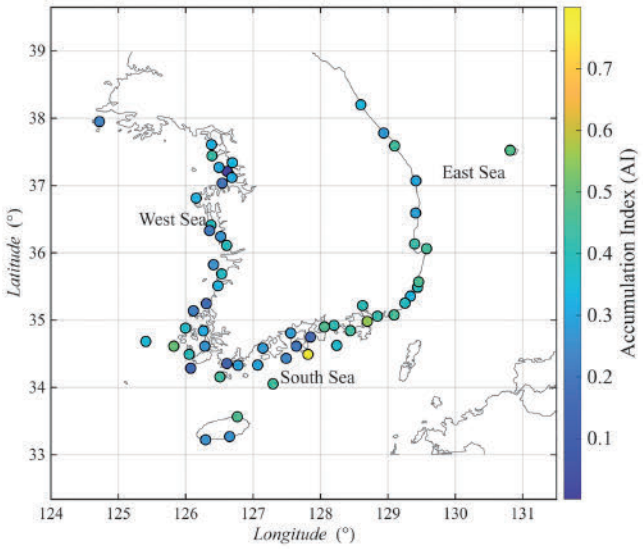

Fig. 2. Spatial distribution of the Accumulation Index (AI) at monitoring stations.

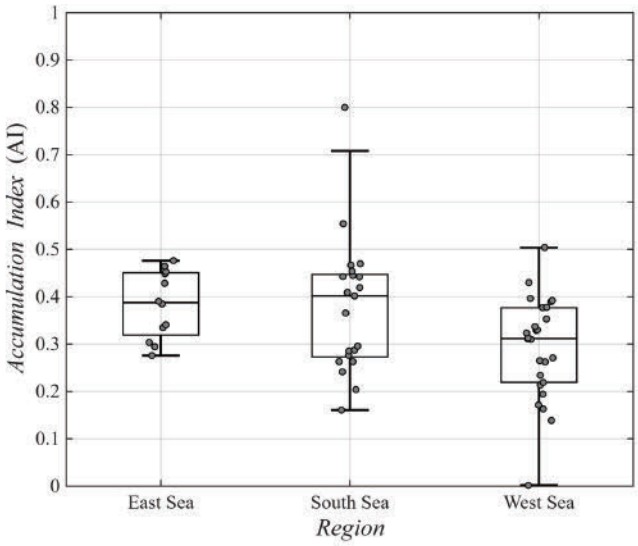

Fig. 3. Comparison of Accumulation Index (AI) distributions by coastal region (East Sea, South Sea, and West Sea).

적으로 높은 수준으로 나타나 쓰레기가 집중적으로 축적되는 경향이 확인된 반면, 대조적으로 축적이 미미한 정점들도 다수 존재하였다. 이러한 공간적 편차는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 해안쓰레기의 분포가 단순한 무작위 확산이 아니라, 연안의 유입원, 해류에 의한 이동 경로, 그리고 해안선 형상 및 지형적 포집 효과 등 다양한 환경적 요인에 의해 구조적으로 형성되고 있음을 시사한다.

권역별 분석 결과에서는 동해와 남해가 유사한 평균 축적 수준을 보이는 반면, 분포 형태에서는 차이가 나타났다. 동해는 정점 간 AI 값의 편차가 비교적 작고 일정 범위 내에 분포하는 특징을 보여 상대적으로 균질한 축적 특성을 나타냈다. 반면 남해는 일부 정점에서 높은 AI 값이 관측되면서 전체 분포 범위가 확대되는 경향을 보였으며, 이는 Fig. 3에서 확인되는 바와 같이 특정 정점에 축적이 집중되는 국지적 고축적 영역의 존재를 시사한다. 서해의 경우 전반적으로 낮은 AI 값을 보이며 중간 범위 내에서 비교적 완만하게 분산된 분포를 나타냈다.

이러한 권역별 차이는 각 해역의 수리역학적 조건과 관련이 있을 가능성이 있다. 다만 본 연구에서는 파랑, 조류 및 해류와 같은 물리적 외력 자료를 직접적으로 포함하지 않았기 때문에, 해당 해석은 기존 연구에서 보고된 일반적인 연안 특성과의 정성적 비교를 기반으로 한 것이다. 동해는 개방형 해역으로서 파랑의 영향이 비교적 균일하게 작용하는 반면, 남해는 복잡한 해안선과 다도해 구조로 인해 국지적인 체류 및 축적이 강화되는 환경을 가지는 것으로 알려져 있다. 서해는 조석 및 연안류의 영향이 지배적인 해역으로, 해안쓰레기의 재이동과 분산이 상대적으로 활발하게 발생하는 특성을 보이는 것으로 보고되어 있다. 따라서 본 연구에서 나타난 권역별 차이는 이러한 연안 특성과 관련이 있을 가능성이 있는 것으로 해석될 수 있다.

3.2 발생 빈도 및 변동성에 따른 축적 유형 분석

유형 구분을 위해 발생 빈도와 변동성 지표의 평균값을 임계값으로 사용하였다. 전체 정점의 발생 빈도 평균값을 기준으로 고빈도 및 저빈도 정점을 구분하고, 변동계수의 평균값을 기준으로 고변동 및 저변동 정점을 구분하였다. Fig. 4의 점선은 각각 발생 빈도와 변동계수의 평균값을 나타내며, 이를 기준으로 네 개의 영역으로 정의하였다. 이와 같은 평균값 기반 분류는 전체 정점의 상대적 분포를 기준으로 축적 유형을 구분하기 위한 탐색적 방법으로 적용되었으며, 특정 임계값을 임의로 설정하는 것을 피하기 위한 기준으로 활용되었다.

발생 빈도가 평균값 이상이고 변동성이 평균값 미만인 정점은 일정한 수준의 쓰레기가 반복적으로 유입되어 지속적으로 축적되는 특성을 보이며, 이는 지속적 축적형으로 해석될 수 있다. 반대로 발생 빈도는 평균값 미만이나 변동성이 평균값 이상인 정점은 특정 시점에서 대량 유입이 발생하는 이벤트성 축적형의 특성을 나타냈다. 발생 빈도와 변동성이 모두 평균값 이상인 정점은 반복적인 유

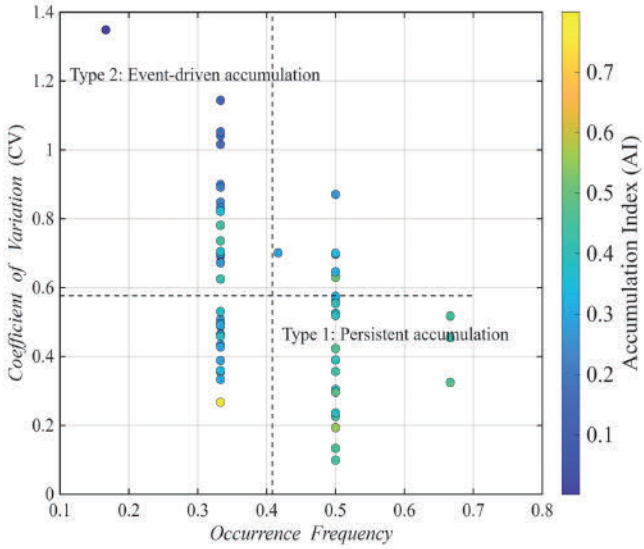

Fig. 4. Relationship between occurrence frequency and coefficient of variation (CV) at each monitoring station.

입과 함께 외력에 의한 변동성이 동시에 크게 나타나는 복합적 특성을 보였으며, 두 지표가 모두 평균값 미만인 정점은 전반적으로 축적 수준이 낮고 안정적인 특성을 나타냈다. 이러한 유형 구분은 해안쓰레기 축적이 단일한 메커니즘에 의해 형성되는 것이 아니라, 유입 빈도와 외력에 따른 변동성이 복합적으로 작용한 결과임을 보여주며, 정점별 축적 특성을 이해하는 데 중요한 분석 기준을 제공한다.

축적 특성 지수가 높은 정점들을 중심으로 분석한 결과, 고축적 정점들은 공통적으로 높은 평균 축적량과 높은 발생 빈도를 동시에 가지는 것으로 나타났다. 이는 해당 정점들이 해안쓰레기의 유입

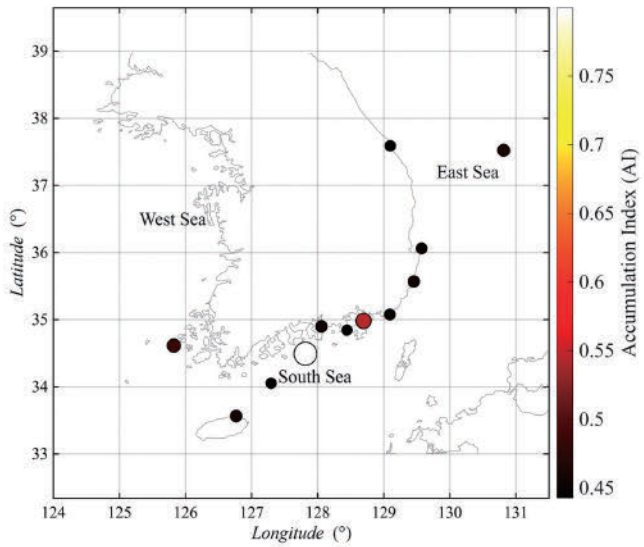

Fig. 5. Spatial distribution of monitoring stations with high Accumulation Index (AI).

및 이동 과정이 수렴되는 물리적 종착점 역할을 수행하고 있음을 의미하며, Fig. 5에서 확인되는 바와 같이 이러한 정점들은 특정 해역에 군집된 형태로 분포하는 경향을 보였다. 특히 일부 정점에서는 최대 축적량이 크게 나타나 특정 시점에서의 집중적인 유입이 존재함을 확인할 수 있었으며, 이는 연안 외력 조건과 밀접하게 연관된 결과로 해석된다.

4. 논 의

본 연구에서 도출된 해안쓰레기 축적 특성은 연안에서 작용하는 수리역학적 과정과 해안선 형상의 영향이 결합된 결과로 해석될 수 있다. 특히 공간적 분포의 불균질성, 권역별 차이, 그리고 발생 빈도와 변동성의 관계는 해안쓰레기 거동을 설명하는 데 참고할 수 있는 정성적 근거를 제공한다.

공간적으로 나타난 축적의 불균질성은 해안쓰레기가 연안 전역에 균일하게 분포하지 않고 특정 정점에 집중되는 경향을 보인다. 이는 해류 및 파랑에 의해 수송되는 과정과 관련될 수 있으며, 특정 해역에서의 체류 시간이 증가하기 때문으로 해석될 수 있다. 연안에서는 파랑에 의한 잉여응력, 연안류에 의한 횡방향 수송, 그리고 해안선 형상에 따른 유동 변화가 동시에 작용하며 쓰레기의 이동 경로를 결정하는 것으로 알려져 있다. 특히 만입부나 곡선형 해안, 또는 구조물이 존재하는 구간에서는 유속 감소와 재순환 흐름이 형성되어 쓰레기가 외부로 이탈하지 못하고 축적되는 경향이 나타나는 것으로 보고되어 있다. 이러한 국지적 수리 환경 차이가 축적 특성 지수의 공간적 편차로 나타난 것으로 해석될 수 있다.

권역별 차이는 각 해역의 수리역학적 특성과 밀접하게 관련이 있을 가능성이 있다. 동해는 개방형 해역으로 파랑의 입사 방향이 비교적 일정하고 해안선이 단순하여 쓰레기의 이동 경로가 직선적인 특성을 보이며 특정 정점에 장기간 체류하기보다는 연안을 따라 이동하며 비교적 균일한 분포를 나타내는 경향이 있다. 반면 남해는 복잡한 해안선과 도서 지형으로 인해 유동이 분절되고 국지적인 순환 흐름이 형성되기 쉬운 환경을 가지는 것으로 보고되어 있어 이러한 조건은 체류 시간을 증가시키고 반복적인 유입을 유도하여 일부 정점에서 높은 축적 특성이 나타나는 원인으로 작용할 수 있다. 서해는 조석의 영향이 지배적인 해역으로, 조류의 주기적 변화에 따라 쓰레기가 재이동과 재분산을 반복하며 전반적으로 낮고 분산된 축적 특성을 보이는 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 파랑, 조류 및 해류와 같은 물리적 외력 자료를 직접적으로 포함하지 않았기 때문에, 이러한 해석은 기존 연구에서 보고된 연안 특성과의 정성적 비교에 기반한 것이다.

발생 빈도와 변동성의 관계는 해안쓰레기 축적의 시간적 특성을 반영하는 것으로 해석될 수 있다. 발생 빈도가 높고 변동성이 낮은 정점은 외력 조건이 비교적 안정적으로 유지되면서 지속적인 유입이 이루어지는 환경을 나타내는 것으로 볼 수 있으며 반대로 발생 빈도가 낮고 변동성이 높은 정점은 특정 시점에서 유입이 집중되는 특성을 보이는 것으로 해석될 수 있다.. 발생 빈도와 변동성이 모

두 높은 정점은 지속적인 유입과 재이동이 동시에 작용하는 환경을 반영하는 것으로 볼 수 있으며, 두 지표가 모두 낮은 정점은 유입이 제한된 조건을 나타내는 것으로 해석이 가능하다.

또한 축적 특성 지수가 높은 정점이 특정 해역에 집중되는 경향은 해안쓰레기의 수송 경로가 일정한 흐름을 따라 특정 지점으로 수렴함을 보여주는 경향이 있다. 이러한 정점에서 높은 평균 축적량과 발생 빈도가 동시에 나타나는 것은 반복적이고 지속적인 축적이 이루어지는 환경을 의미하는 것으로 해석이 가능하다. 이는 해안쓰레기 분포를 이해함에 있어 유입량뿐만 아니라 이동 및 체류 과정에 대한 고려가 필요함을 시사하는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서 제시된 수리역학적 해석은 정점 기반 관측 결과와 기존 연안 특성에 대한 정성적 비교에 기반한 것이며, 향후 파랑, 조류 및 해류 자료와의 연계 분석을 통해 정량적 검증이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 국가 해안쓰레기 모니터링 정점 자료를 활용하여 해안쓰레기의 유입, 이동 및 축적 특성을 공학적 관점에서 분석하였다. 특히 정점별 관측 결과를 기반으로 축적 특성 지수를 정의하고, 이를 통해 해안쓰레기의 공간적 분포와 시간적 축적 특성을 종합적으로 평가하였다.

분석 결과, 해안쓰레기 축적은 전국 연안에서 균일하게 나타나지 않고 뚜렷한 공간적 불균질성을 가지는 것으로 확인되었다. 권역별로는 동해와 남해가 유사한 평균 축적 수준을 보였으나, 남해에서는 일부 정점에서 높은 축적이 나타나는 국지적 집중 경향이 확인되었으며, 서해는 전반적으로 낮고 분산된 축적 특성을 보였다. 또한 발생 빈도와 변동성의 관계를 통해 해안쓰레기 축적은 지속적 축적형, 이벤트성 축적형, 복합적 변동형 등 서로 다른 유형으로 구분될 수 있음을 확인하였다.

이러한 결과는 해안쓰레기 축적이 단순한 발생량의 문제가 아니라, 연안에서의 수리역학적 수송 과정 및 해안선 형상과 관련이 있을 가능성을 시사한다. 다만 본 연구에서는 파랑, 조류 및 해류와 같은 물리적 외력 자료를 직접적으로 포함하지 않았기 때문에, 해당 해석은 정점 기반 관측 결과와 기존 연구에 대한 정성적 비교에 기반한 것이다.

따라서 해안쓰레기 분포를 효과적으로 이해하기 위해서는 유입량뿐만 아니라 이동 및 축적 과정에 대한 통합적 접근이 필요하며, 향후 물리적 외력 자료와의 연계 분석을 통해 정량적 검증이 이루어질 필요가 있다.

또한 본 연구에서 제안한 축적 특성 지수)는 정점 간 상대적 축적 수준과 공간적 분포를 평가하기 위한 분석 지표로 활용될 수 있으나, 실제 수거 실적 또는 관리 우선순위와의 직접적인 비교를 통한 현장 적용성 검증은 수행되지 않았다. 향후 연구에서는 수거량 자료 및 전문가 판단과의 연계 분석을 통해 지표의 실무적 유효성을 검증할 필요가 있다.

본 연구의 결과는 해안쓰레기 거동의 공간적 특성을 이해하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 디자인산업기술개발사업(과제번호: 2410014215)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

[1] Critchell, K. and Lambrechts, J., 2016, Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes?, Estuar. Coast. Shelf Sci., 171, 111-122.

[2] Do, Y.B. and Yoon, H.J., 2024, Study on the Application of RT-DETR to Monitoring of Coastal Debris on Unmanaged Coasts, J. Korea Inst. Electron. Commun. Sci., 19(2), 453-466.

[3] Han, J.R., Kim, T.H., Lee, C.Y. and Choi, H.W., 2023, Visualization Technique of the National Beach Litter Monitoring Data Considering the Coastal Shape of Korea, J. DCS, 24(10), 2423-2431.

[4] Jang, S.W., Park, J.M., Chung, Y.H., Kim, D.H. and Yoon, H.J., 2012, A Study on the Inflow and Seasonal Characteristics of Foreign Marine Debris in the Coastal Area of the West Sea. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 15(2), 89-100.

[5] Kang, M.K., Kim, D.H., Park, S.W., Seo, B.M., Park, J.W. and Hyun, C.U., 2025, Identifying Coastal Waste Sources Using Drifter Buoy-Based Floating Debris Pathway Analysis at River Outlets on Jeju Island, South Korea, Korean J. Remote Sens., 41(5), 911-925.

[6] Kim, D. H., 2023, Long-term (1995-2021) Variations of Physical Properties of Seawater in the Seas around the Korean Peninsula, Seoul National University, Seoul, Korea.

[7] Kim, Y.M,, Jang, S.W., Kim, H.M., Bak, S.H., Lee, S.H., Yu, J.W. and Joung, T.H., 2024, Detection of Hazardous River Floating Debris using CCTV Images and Semantic Segmentation Model, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 27(2), 111-120.

[8] Kim, Y.M., Jang, S.W., Kim, D.H. and Yoon, H.J., 2019, Behavior Characteristics of Foreign Marine Debris into the West Sea of Korea in Winter using Satellite Tracked Drifters, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 22(4), 191-202.

[9] Lebreton, L.M., Greer, S.D. and Borrero, J.C., 2012, Numerical modelling of floating debris in the world's oceans. Mar. Pollut. Bull., 64(3), 653-661.

[10] Lee, S.H., Hong, S.K., Lee, J.S., Yu, J.W., Kim, H.T. and Joung, T.H., 2024, Estimating the Temporal Impacts of Nearshore Fisheries on Coastal Ocean-Sourced Waste Accumulation in South Korea Using Stepwise Regression, Sustainability, 16(13), 5663.

[11] Lopez, E.M.B., 2021, Marine Debris Removal: A Case Study on South Korean Marine Litter Management. University of Rhode Island, Kingston, RI, USA.

[12] Morishige, C., 2010, Marine Debris Prevention Projects and Activities in the Republic of Korea and United States A compilation of project summary reports, https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/2533 (accessed 2026.03.24.)
[13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021, Reckoning with the US role in global ocean plastic waste, The national academies press, Washington, D.C.
[14] Public data portal, Marine Debris Monitoring Information Service of the Ministry of Oceans and Fisheries, https://www.data.go.kr/data/15114321/openapi.do (accessed 2026.03.24.)
[15] Public data portal, National Coastal Debris Monitoring Survey Stations of the Ministry of Oceans and Fisheries, https://www.data.go.kr/data/15129575/fileData.do (accessed 2026.03.24.)
[16] Seo, D.C,, 2019, Comparison and Analysis of Monitoring Methods for Marine Debris on Beach, J. Korea Soc. Waste Manag., 36(8), 802-810.
[17] Sim, W.J., Planning project for surveillance and ecological effects assessment of marine meso- and macroplastic debris, https://sci-watch.kiost.ac.kr/handle/2020.kiost/36569 (accessed 2026.03.24.)
[18] Woo, M.S. and Kim, Y.B., 2022, Distribution Characteristics of Marine Debris in the Northwest Coast of Ulleungdo during 2020-2021, J Fish Mar. Sci Educ., 34(3), 446-457.

Received 26 March 2026
1st Revised 23 April 2026, 2nd Revised 6 May 2026
Accepted 6 May 2026