

Original Article

## 담수 확산 범위의 통계적 기준 및 관측 정점의 적정성 평가 제언

이기섭<sup>1</sup> · 진호군<sup>2</sup> · 조홍연<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양과학기술원 해양빅데이터·AI센터 연수연구원  
<sup>2</sup>한국해양과학기술원 해양빅데이터·AI센터 UST학생연구원  
<sup>3</sup>한국해양과학기술원 해양빅데이터·AI센터 책임연구원

### Statistical Criteria of ROFI Regime and Spatial Adequacy Assessment of Monitoring Stations

GiSeop Lee<sup>1</sup>, Ho-Kun Jeon<sup>2</sup>, and HongYeon Cho<sup>3,†</sup>

<sup>1</sup>Post Doctoral Scientist, Marine Bigdata AI Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

<sup>2</sup>Graduate Student, Marine Bigdata AI Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

<sup>3</sup>Principal Research Scientist, Marine Bigdata AI Center,  
Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Korea

#### 요 약

공공 연안 관측자료를 이용한 다양한 연안환경 연구가 수행됨에 따라 해당 자료의 활용성 제고를 위한 논의가 대두되고 있으며, 이를 위해서는 관측정점에 대한 정성적 평가보다 구체적인 관측정점에서 계속된 물리량에 대한 정량적 평가를 제시할 필요가 있다. 이 연구에서는 담수의 영향이 미치는 영역을 정량적으로 제시하기 위해 1997-2021년 해양환경측정망자료 내 연안 염분 관측자료를 분석했다. 염분의 평균 및 평균 경사보다는 해역의 염분 확산 특성을 고려한 표준편차의 공간변화가 담수 확산 범위 추정에 보다 적절한 것으로 파악되었으며, 관측자료로부터 통계적 담수 영향 범위는 염분 표준편차 경사를 적용해  $\Delta\sigma/\Delta s \geq 0.14(\text{PSU}/\text{km})$ 를 제안한다. 제안된 방법을 통해 추정된 담수 확산 영역은 우리나라 주요 하천 인근 해역으로 나타나는 반면, 현재 관측정점의 공간적 배치는 일부 해역에서 담수 영향 범위를 충분히 대표하지 못하는 것으로 판단된다. 미관측 영역에서 높은 분산 추정오차는 제한요소가 되므로, 향후 추가적인 정점 확장을 통해 해당 오차는 점진적으로 감소할 수 있다. 제안된 방법은 담수 확산을 비롯한 과학적인 연안 해역 확정에 기여할 것으로 판단된다.

**Abstract** – As various coastal environment studies are being conducted using publicly available coastal observation data, there has been a growing need for the improvement of the utilization of this data. To achieve this, it is necessary to present a quantitative evaluation of the physical quantities measured at specific observation points, rather than a qualitative evaluation. Therefore, in this study, a statistical method is proposed to estimate the region of freshwater influence(ROFI) by using the variation and spatial gradient of water salinity at each observation point of the marine environmental monitoring system from 1997 to 2021. The spatial variation of standard deviation, considering the salinity dispersion characteristics of the area rather than the mean and mean gradient of salinity, was identified as more suitable for estimating the ROFI. A value of  $\Delta\sigma/\Delta s \geq 0.14(\text{PSU}/\text{km})$  is proposed. The estimated ROFI suggested by the proposed method is shown to be the main coastal areas near major rivers, while it is expected that the current spatial arrangement of observation points does not sufficiently represent the ROFI in some areas. The high estimated error of variation in unobserved areas is a limiting factor, so this error can be gradually reduced through additional point expansion in the future. The proposed method is considered to contribute to the scientific understanding of coastal areas, including the spread of freshwater.

**Keywords:** Spatial Correlation(공간 상관), Universal Kriging(일반 크리깅), Variance Gradient(분산 경사), Region of Freshwater Influence(담수 영향범위), Observation Points Evaluation(관측정점 평가)

<sup>†</sup>Corresponding author: [hycho@kiost.ac.kr](mailto:hycho@kiost.ac.kr)

## 1. 서 론

연안은 인구의 약 40%가 거주하는 생활 영역이다(SEDAC, 2011). 하구를 포함한 연안의 범위는 인간의 생활과 밀접한 연관이 있으며, 다양한 해양 현상의 연구에도 중요하다. 연안 해역(이하 연안)은 다양한 인간 활동에 영향을 받는 공간으로, 대부분의 오염물질은 육상에서 기인하는 것으로 보고된다(Zhao *et al.*[2015]; Prouty *et al.*[2017]; Wang *et al.*[2021]; Liu *et al.*[2022]). 이러한 연유로 연안 환경 관측망 운영은 시공간적인 변화를 추적하는데 중요한 역할을 하며, 관측 자료 기반의 연안 환경변화에 대한 연구들이 많이 수행되고 있다(Lee and Moon[2008]; Park *et al.*[2018]; Won *et al.*[2019], Park *et al.*[2019]).

그 배경에는 공공데이터의 개방과 활용의 중요성이 대두되면서 다양한 자료들을 생산 및 배포하는 노력들이 있다. 현재 우리나라에서 주기적으로 해양 관측 자료를 생산하고 공개하는 공공기관은 국립해양조사원, 국립수산과학원, 해양환경공단이 대표적이다. 국립해양조사원은 바다누리해양정보서비스를 통해 실시간해양관측, 격자형해양정보를 제공하며, 국립수산과학원은 한국해양자료센터를 통해 연안정지관측, 정선해양관측 자료를 제공하고 있다(KHOA[2022]; NIFS[2022]). 해양환경공단 또한 해양환경정보포털을 통해 해양환경측정망 자료를 제공하고 있다(KOEM, 2022). 이 중 해양환경공단은 해양환경관리법 제11조 등 관련 법규에 따라 해양환경 및 생태, 폐기물, 해역이용영향평가와 같이 해양 환경에 특화된 정보들을 제공한다.

환경변화의 추적을 목적으로 하는 이러한 관측 프로그램은 시·공간적인 해양환경 변화를 감지할 수 있도록 충분한 영역을 포함해야 한다. 특히 주로 육지와 가까운 연안에서 관측하고 있는 관측 정점은 관측 항목의 공간적인 영향 범위 내에서 효율적으로 운영되어야 한다. 해양 환경 인자의 공간적인 관측 범위는 넓게는 현행법상 연안으로 정의되는 영역을 고려할 수 있다. 연안관리법 제2조에서는 “해안선으로부터 영해의 외측한계까지의 사이”라고 정의하여 법률상 연안 해역은 실질적으로 국제법상 영해의 범위인 해안선으로부터 12해리(약 22.2 km)를 의미한다(Ministry of Government Legislation, 2022).

그러나 과학적인 관점에서, 육상의 영향이 미치는 범위는 대표적으로 보존성 물질인 염분을 기준으로 판단할 수 있으며, Simpson[1997]은 담수 영향범위(Region of freshwater influence, ROFI)를 정의하였으며, Horner-Devine *et al.*[2015]은 담수의 영향 범위가 지역적인 특성에 의해 다양한 형태로 존재함을 보고했다.

우리나라 연안에 대해서는 Cho *et al.*[2008]이 수행한 아산만 연안의 담수 영향범위를 추정한 사례가 있으나 지역적 범위가 좁아 우리나라 전 연안 해역을 대상으로 일반화하기는 어렵다. 수치모델을 이용한 하구 및 연안역에서의 담수 확산 범위 연구들은 꾸준히 수행되어 왔다(Lee *et al.*[2003], Jeong *et al.*[2007], Jung and Kim[2008], Kang *et al.*[2009], Lee *et al.*[2021]). 최근 수행된 연구로, 수치모델 모의를 통해 경기만에서 담수 확산 영향범위를 검토한 사례가 있

며, 관측값의 범위를 고려하여 28psu의 염분 농도를 담수 영향범위를 결정하는 기준으로 사용했다(Lee *et al.*[2021]). 그러나 여러 선행 연구 사례에서 공통적으로 관측 자료의 범위를 이용한 경험적인 수치를 제시한 것 외에 공간통계를 활용한 정량적 분석을 수행한 사례는 없었으며, 수치모델 활용 연구의 특성 상 수십 년의 모의 기간을 계산하는 것이 어렵기 때문에 장기 모의 결과를 활용한 사례도 찾아보기 어렵다.

기상 및 기후 분야에서는 해양부이 자료와 내륙의 AWS 자료를 이용하여 풍속과 기온의 기울기에서 뚜렷한 대비가 나타나는 영역을 연안지대로 정의한 사례가 있다(Lee *et al.*[2004]). 이는 해양의 영향을 받는 육상 영역에 대한 경계 정의의 문제이며 복잡한 연안 육역의 현상들을 설명하기 위한 기초 연구로서 높은 가치가 있다.

이러한 배경을 바탕으로, 본 연구에서는 해양환경관측망 자료 중 염분 자료를 활용하여 우리나라 연안 해역에서 관측한 자료를 이용하여 공간통계 기반의 정량적 담수 확산 범위를 제안하고, 현재 연안 조사 관측망의 공간적 적절성을 검토하며, 보다 효과적인 연안 관측 방향에 대하여 논의한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 연구 자료

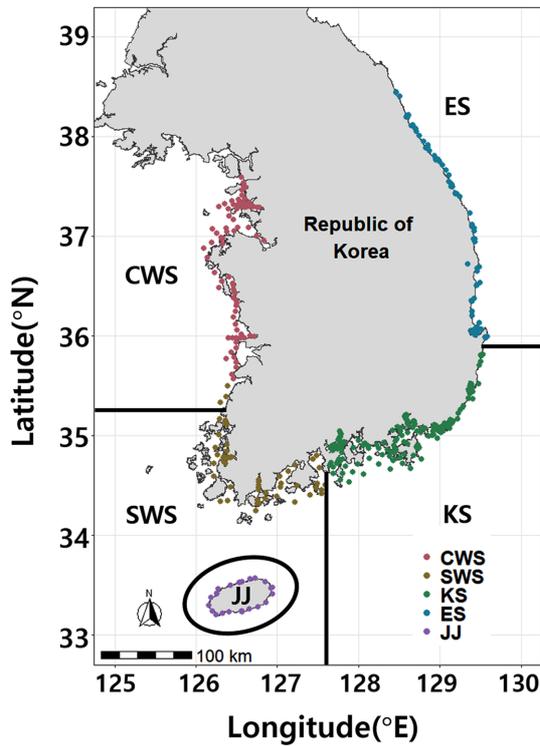
본 연구 수행에는 해양환경공단의 해양환경측정망 자료(이하 자료)와 해양조사원에서 제공하는 약최고고조면 해안선 자료를 사용했다. 자료는 현재 해양환경정보포털(<https://www.meis.go.kr>)에서 제공되고 있으며, 해안선 자료는 공공데이터포털(<https://www.data.go.kr/>)에서 검색을 통해 다운로드 받을 수 있다.

자료는 1997년부터 2021년까지 총 25년의 자료를 사용했다. 자료는 대한해협, 동해, 서남해역, 서해중부, 제주의 5개 생태구(Ecoregion)로 분류되어 있으며 이는 다시 근해, 연안, 하천영향 및 반폐쇄성해역, 항만으로 그룹이 분류되어 제공되고 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 근해와 항만 자료를 제외하고 연안, 하천영향 및 반폐쇄성해역 자료를 사용했다. 해당 자료는 연 4회(2,5,8,11월) 관측한 자료로 총 29,100개이며 수심부터 염분소 농도까지 16개 관측 항목이 표층 저층으로 구분되어 총 32개 항목이 제공되고 있다. 이와 함께 국립수산과학원 정선관측자료(이하 보조자료)를 함께 활용했으며, 표층 자료를 사용했다. 사용된 보조자료의 수는 64,337개이며 이 중 표층 수온 및 염분 항목을 사용했다.

자료 사용 전, 통계 정보들을 활용하여 결측 및 이상자료를 탐지하고 분석에서 제외시켰다. 관측 항목 중 수온, 염분, 수소이온농도 항목을 이용하였으며, 1차 검토에서 이상자료로 판단하고 제외된 기준은 WOD18(Garcia *et al.*[2018])의 북서태평양 연안을 범위를 기준으로 하여 제외시켰다. 항목별 기준은 다음과 같다.

1. 수온(°C)이 35를 초과하거나 -2.1 미만인 경우
2. 염분(psu)이 40을 초과하거나 0 미만인 경우
3. 수소이온농도(pH)가 8.9를 초과하거나 7.0 미만인 경우

본 연구에서는 염분 항목을 주력으로 사용하지만 수온 및 수소이



**Fig. 1.** Observation points of KOEM Marine Environment Monitoring System by ecoregion. CWS: Central West Sea, ES: East Sea, JJ: Jeju, KS: Korea Strait, SWS: South West Sea respectively.

온농도 또한 전기전도도 기반의 관측 항목이기 때문에 교차 검토를 위해 사용했다. Table 1의 결과에서 알 수 있듯 염분을 제외한 두 항목(수온 및 표·저층 수온차이, 수소이온농도)을 이용한 조건 중 하나라도 이상자료로 판단되는 항목은 179개로 전체 자료의 0.6%로 나타났고, 보조자료는 표층 수온과 염분 항목을 대상으로 같은 방법을 적용했다.

상기 조건과 함께 정성적 검토를 통해 실제 자료에서 이상자료로 판단하여 제외된 자료의 세부 내역은 Table 1과 같으며 전처리된 거치고 최종 사용된 자료의 수는 28,708개, 보조자료는 63,077개이다.

분석에 앞서, 계절에 따른 변화가 존재하는 시계열 자료를 이용하여 통계량을 계산할 때에는 결측자료의 분포를 반드시 확인해야

한다. 분류모델의 경우, 결측률에 따라 자료의 전처리 방법을 달리 해야하며, 1% 미만은 심각한 영향이 없고, 1~5%는 관리 가능하며, 5~15%의 결측은 정교한 방법론을 이용한 결측치 대치가 필요하다 (Acuna and Rodriguez[2004]). 또한 시계열 자료는 결측 시기에 따른 문제가 발생할 수 있으며, 예를 들어, 수온이 낮은 겨울의 관측 자료에 결측이 많은 경우 평균 수온이 실제보다 높게 추정되므로 사전에 결측 분포를 확인해야 한다.

본 연구에 사용한 자료에서 전체 자료의 월별 자료 수는 각각 2월 7,033, 5월 7,224, 8월 7,194, 11월 7,257개로 나타나 자료 수가 가장 적은 달과 가장 많은 달의 비율이 약 97%로 나타났다. 또한 각 지점의 계절별 최저 자료수와 최대 자료수의 비율 분포가 평균 약 97%로 나타나 정점 통계량을 계산할 때 편향이 발생할 우려가 적은 것으로 판단했다.

육상과의 거리에 따른 염분 분포와 변화 양상 검토를 위하여 먼저 해안선 공간자료에 대한 전처리를 수행하고 연구 영역을 설정했다. 관측자료의 공간추정 범위를 제한하기 위해 관측 정점 좌표를 기준으로 30 km 이내의 범위를 외측 경계로 하고 우리나라 약최고 고조면을 기준으로 하는 해안선을 내측 경계로 하는 해상도 1 km<sup>2</sup> 격자를 생성했다. 이때 분석 결과의 시각화를 위하여 분석자의 정성적 판단에 따라 부산 영도의 면적보다 작은 소규모 도서들을 삭제했다.

### 2.2 분산분포 및 공간자기상관

관측된 자료의 공간적 변화 양상과 담수 확산 범위를 검토하기 위하여 정점별 분산의 공간분포 및 분산통계량의 공간자기상관을 사용했다. 정점별 분산은 전처리된 자료 중 관측 시작 시점부터 2021년까지의 시계열자료를 이용하여 계산했다.

공간자기상관은 공간에 분포한 자료의 상관관계를 나타내며, 일정 분리거리에 있는 자료 쌍들의 공분산을 이용하여 계산한다. 이를 Variogram이라고 하며 해당 공간에 분포하는 무한의 모든 점에 대한 값을 알 수 없으므로 관측자료를 이용한 통계적 추정 과정을 거친다. 앞서 언급한 방법과 같이 먼저 자료를 이용한 경험적 Variogram을 각 분리거리마다 계산한 뒤 이를 일반화시킬 수 있는 최적의 모델을 추정한다. 본 연구에서 Variogram 모델은 식 (1)과 같이 널리 이용되는 구형모델을 사용했다(Clark, [1979]; Doney *et al.*[2003]).

**Table 1.** Result of detection and exclusion of outliers in the marine environment monitoring system of the Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM) and serial oceanographic observation data of the National Institute of Fisheries Science (NIFS)

Variables	Conditions	Applied Dataset	n
Surface Temperature ( $T_s$ )	$T_s > 35$ & $T_s < -2.10$	KOEM, NIFS	1
Bottom Temperature ( $T_b$ )	$T_b > 35$ & $T_b < -2.10$	KOEM	0
$T_b - T_s$	$(T_b - T_s) > 1$	KOEM (Month 5, 8)	64
Water Salinity ( $S$ )	$S > 40$	KOEM, NIFS	1,112
potential of hydrogen (pH)	$pH > 8.9$ & $pH < 7.0$	KOEM	117
$T, S, pH$	$T = \text{Nan}$   $S = \text{Nan}$   $pH = \text{Nan}$	KOEM	213
$T_s, S_s$	$T_s = \text{Nan}$   $S_s = \text{Nan}$	NIFS	169
Observations of Duplicated Condition			-20
Total number of missing and outliers			1,652

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 \left( 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + b & h \geq a \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 분리거리이며,  $a$ 는 상관거리(Range 또는 Decorrelation Length),  $b$ 는 너겟(Nugget)이다. 문턱값(Sill)은  $C_0 + b$ 이며, 여기서  $C_0$ 는 부분 문턱(Partial Sill)이다. 상관거리를 벗어나는 문턱값은 관측 자료의 분산으로 처리한다. Variogram 모델에서 상관거리는 자료의 상관성이 유지되는 거리를 의미하며, 가까울수록 상관성이 높다. 이론적으로 같은 분리거리에 있는 자료는 분산이 0이어야하나 자료 자체의 변동성이 존재할 수 있다. 따라서 너겟은 관측오차와 같이 자료가 가진 근본적인 분산 값을 의미한다. 많은 통계 이론에서는 공간적 정상성(Stationarity)을 가정하나 실제 관측 자료에서는 이를 엄격히 적용하기 어려우며, 많은 경우 약한 정상성을 갖는 것으로 간주한다(Cressie, [1991]). 이 조건에서 문턱값은  $h$ 의 증가에 따라 특정 값으로 수렴하며, 문턱값이 최초로 나타나는 거리가 상관거리가 된다.

### 2.3 분산의 공간 추정 및 공간 경사

연안 해역의 염분 변화 양상과 변동성이 높은 해역의 범위를 판단하기 위하여, 각 정점의 시간에 따른 평균과 분산을 계산하고 그에 대한 공간 분포를 추정했다. 분산의 공간 분포 추정은 Universal Kriging(UK) 기법을 사용했다(Matheron[1969]). UK는 자료 사이의 상관만을 고려한 Ordinary Kriging(OK) 기법에 공간 변화 경향을 반영한 방법으로, 공간좌표를 보조변수(Auxiliary Variable)로 사용하며, 이를 기타 보조변수로 확장한 방법을 Kriging with External Drift(KED)로도 부른다(Hengl *et al.*[2003]). UK는 식 (1)과 같이 표현한다.

$$\hat{z}_0(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i(s_0) z_i(s_i) \quad (1)$$

여기서,  $\hat{z}_0(s_0)$ 는 추정지점  $s_0$ 의 값,  $z_i(s_i)$ 는  $s_i$  지점의 관측값이며,  $w_i$ 는 각 관측값의 가중치이다. 가중치  $w_i$ 와 제약조건들의 집합인 벡터  $\lambda$ 는 다음 식 (2)를 이용해 구한다.

$$\lambda = \begin{bmatrix} w \\ \phi_0 \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & I_n & X \\ I_n^T & 0 & 0_m \\ X^T & 0_m^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_0 \\ 1 \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 각 분할행렬(Block Matrix)의 구성 요소 및 계산 방법은 부록에 상세하게 기재했다.

염분의 변동성이 완화되는 해역의 정량적 결정은 추정된 분산을 직접 이용할 수도 있지만, 추정된 분산의 공간 경사를 이용하는 방법을 생각해볼 수 있다. 계산된 분산  $\sigma^2$ 에 대하여, 공간 경사는 Fig. 2와 같은 좌표 체계에서 계산 대상 격자  $i, j$ 를 기준으로 식 (3)과 같이 주변 8개 격자의 값을 이용하여 계산한다(Horn[1981]). 식 (3)에서,  $z = \sigma^2$ 이며, 아랫 첨자  $+$ ,는 각각  $x, y$  방향의 좌표 이동을 의미한다.

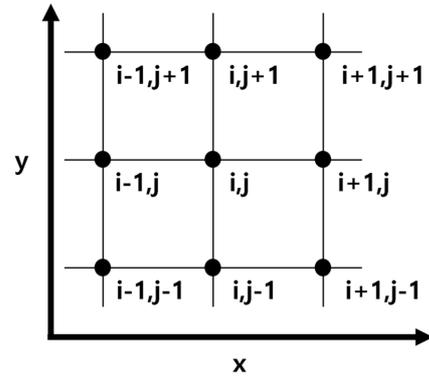


Fig. 2. Conceptual grid representation for Horn's hill shading method.

$$\frac{\Delta z}{\Delta s} = \sqrt{\left( \frac{\Delta z}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{\Delta z}{\Delta y} \right)^2} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta z}{\Delta x} = \frac{(z_{+,+} + 2z_{+,0} + z_{+,-}) - (z_{-,+} + 2z_{-,0} + z_{-,-})}{8\Delta x} \quad (3.1)$$

$$\frac{\Delta z}{\Delta y} = \frac{(z_{+,+} + 2z_{0,+} + z_{-,-}) - (z_{+,-} + 2z_{0,-} + z_{-,-})}{8\Delta x} \quad (3.2)$$

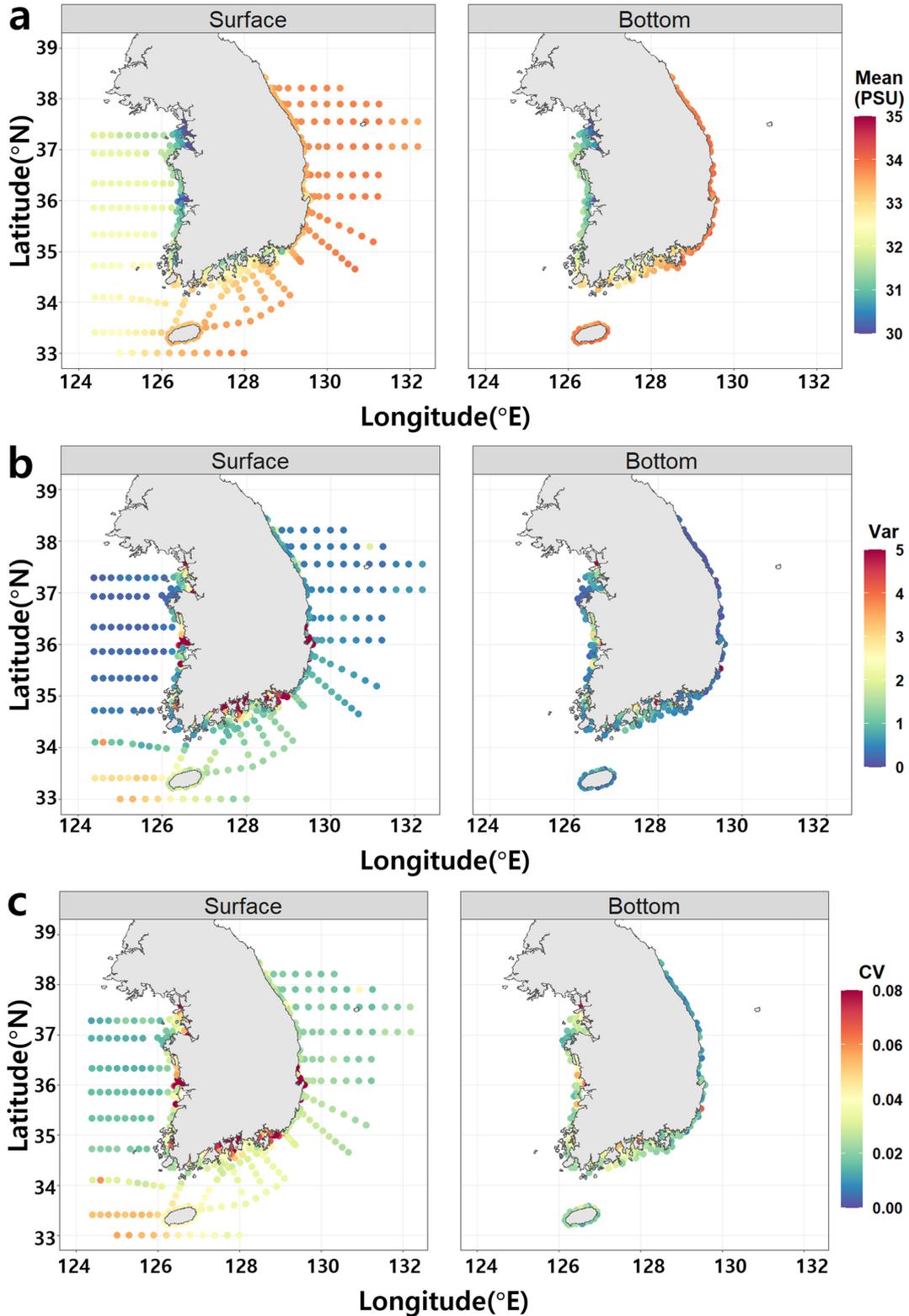
각 해역의 염분 분산 변화 특성이 다를 것으로 가정하였으며, 염분 분산의 공간 경사가 일정 수준 이하로 완만해지는 지점을 경계로 간주한다. 담수 영향 범위의 경계는 분위수에 통계 검정의 유의수준( $\alpha$ ) 개념을 적용했다. 유의수준은 일반적으로 0.05 내지 0.1을 사용하며 1종 오류의 최소화를 목적으로 제시되는 수치이나, ‘우연에 대한 관념을 기각하는 임계치’로 분석자의 주관에 따라 바뀔 수 있다(Cowles and Davis[1982]). 분산 경사의 상한 임계값을 결정하는 기준으로  $1-\alpha$  분위수를 적용하여 결과를 비교했다.

## 3. 결 과

### 3.1 평균 염분 및 분산의 공간 분포

연구 대상 해역의 정점별 통계량 계산 결과는 Fig. 3과 같다. 정점별 평균에 대한 공간 분포는 주요 하천인 한강과 금강이 방류되는 서해안이 낮게 나타났고, 남해안 또한 연안 가까운 곳에서는 낮은 평균 염분을 보이거나 연안으로부터 거리가 멀어질수록 서해안에 비해 염분이 크게 상승했다. 동해안으로는 4대강과 같은 하천 유입이 거의 없기 때문에 평균 염분이 높은 것으로 나타났다(Fig. 3a).

정점별 분산과 변동계수( $\sigma/\mu$ )를 검토한 결과는 평균 변화 경향과는 다른 양상을 보였다. 담수의 영향을 많이 받는 영역이라도 기저 염분 농도가 낮은 서해안의 경우 분산과 변동계수는 연안 가까운 정점에서 큰 값을 나타내고, 평균 염분 농도에서 보이는 완만한 변화 양상은 보이지 않는다. 분산과 변동계수는 표층에서 일부 해역의 급격한 변화가 저층에서는 두드러지지 않았다. 분산 및 CV는 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 형산강 인근 해역에서 각각  $\geq 10, \geq 0.1$  수준으로 높게 나타났고 영산강 인근 해역은 각각  $< 5, \leq 0.025$ 로, 앞서 언급한 해역보다는 상대적으로 낮았지만 하천 유입이 없는 다른 해역



**Fig. 3.** Mean (a), variance (b), coefficient of variations (c) of water salinity of each station. Auxiliary data (NIFS serial oceanographic observation data) was also used for surface distribution.

보다는 높은 값을 보였다(Fig. 3b, Fig. 3c).

시간에 따른 염분 변화가 공간변화에 영향을 미치는지 확인하기 위해 표층 염분 자료의 시간 및 공간에 대한 교호작용이 있는지 검

토했다. 서해중부 생태구가 뚜렷하게 구분되며, 동해와 제주, 대한해협과 서남해역 생태구 사이에 교호작용이 있는 것으로 나타났다. 계절성은 각 생태구에서 공통적으로 보이는 특성이며, 각 생태구들의

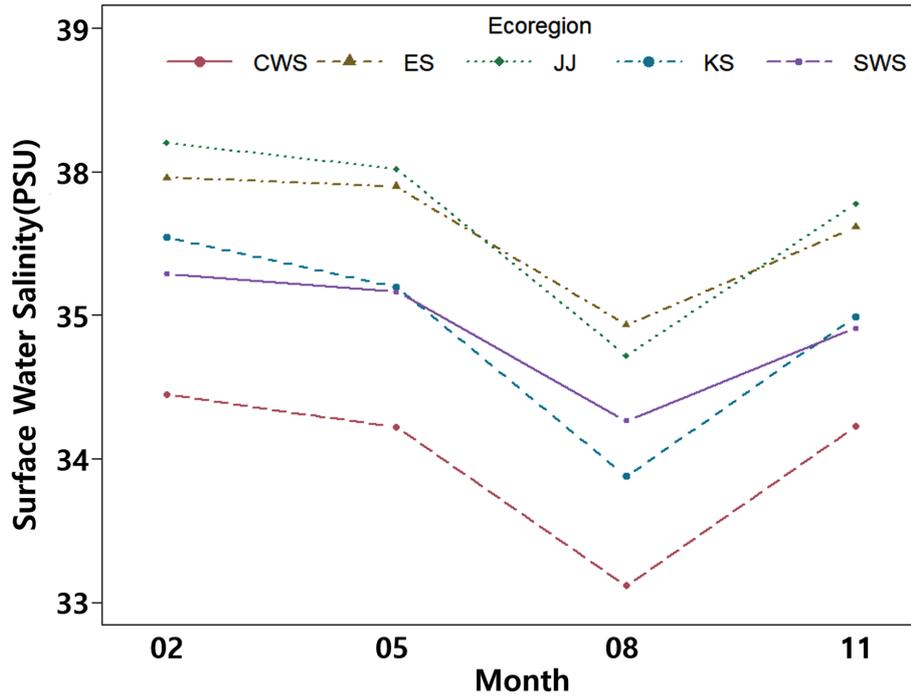


Fig. 4. Temporal variations in surface water salinity for each ecological region, indicating whether there is interaction between space and time. Interaction occurs between ES and JJ, and between KS and SWS, but spatial variations mostly explain surface water salinity variations.

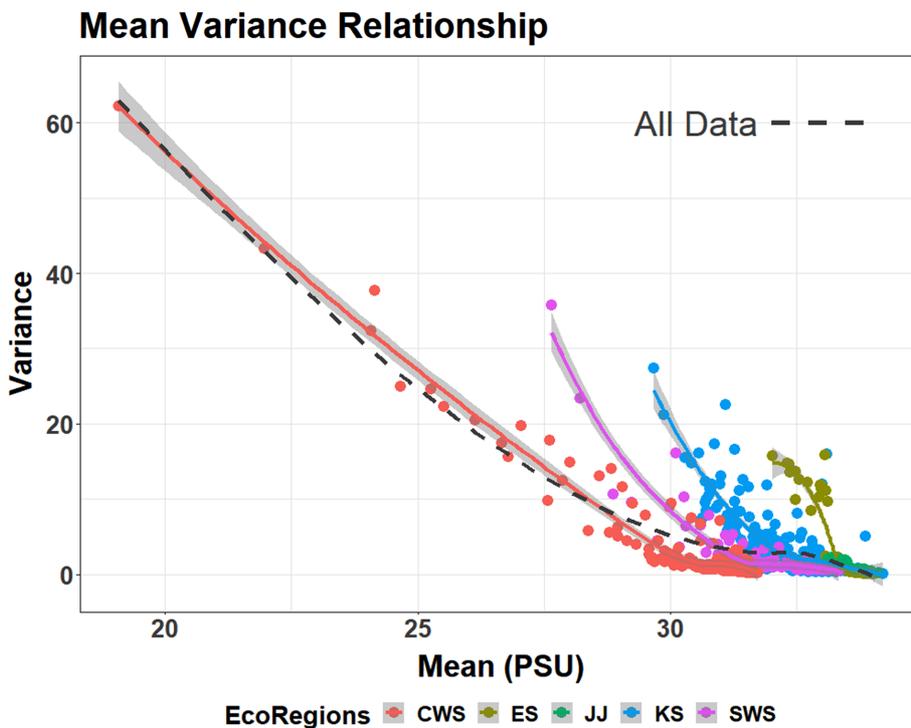


Fig. 5. Relationship between mean and variance of water salinity by ecoregion (CWS: Central West Sea, ES: East Sea, JJ: JeJu, KS: Korea Strait, SWS: South West Sea).

시간에 따른 염분 변화 양상은 평행에 가깝기 때문에 공간에 의한 정보 변동 효과를 독립적으로 검토할 수 있다(Fig. 4). 따라서 이후 분석에서는 공간에 따른 영향만을 고려했다.

**3.2 염분의 공간 통계 특성**  
연안에서 염분의 분산은 평균 농도와 반비례하는 경향을 보이는데, 이러한 경향성 또한 해역별 특징이 상이함을 알 수 있다(Fig. 5).

전체 자료에서는 지렛대 효과(Leverage Effect)로 서해중부 및 서남해역 생태구의 평균 염분과 분산이 전반적인 경향을 주도한다. 그러나 대한해협 및 동해 생태구의 경우 평균 약 33.4 psu로, 서해중부 및 서남해역 생태구 평균인 약 30.7 psu와 비교하여 평균적으로 높은 배경 농도를 보임과 동시에 동일한 분산 구간에서 상대적으로 높은 분산 변화율을 보인다. 해역별로 배경 염분 농도의 차이가 관찰되며, 분산도 해역에 따라 급변하기 시작하는 평균 염분 구간이 다르다. 대한해협과 서남해역 생태구는 평균 약 31.8 psu로 평균 농도가 같지만 분산변화가 급격해지는 평균농도에서 차이를 보인다. 기저염분 농도 범위를 벗어난다는 것은 담수의 확산 양상에 따라 공간적인 변화가 있음을 나타낸다. 따라서 분산의 공간적인 변화율은 기저염분 농도의 영향을 배제하고 상대적인 해역 특성을 반영한 통계적 담수 확산 범위의 설명 방법으로 합리적이다.

UK를 이용한 공간추정 과정에서 구형모델을 이용한 Variogram 모델 적합 결과를 통해 자료의 거리에 따른 상관거리 변화를 검토했다(Fig. 6). 표층 염분의 Decorrelation Length는 약 12 km로 계산되었으며, 이는 염분의 경우 연안 관측 정점 사이의 상관관계가 평균적으로 12 km 이상 확장되지 않음을 의미한다(Fig. 6a). 저층의 경

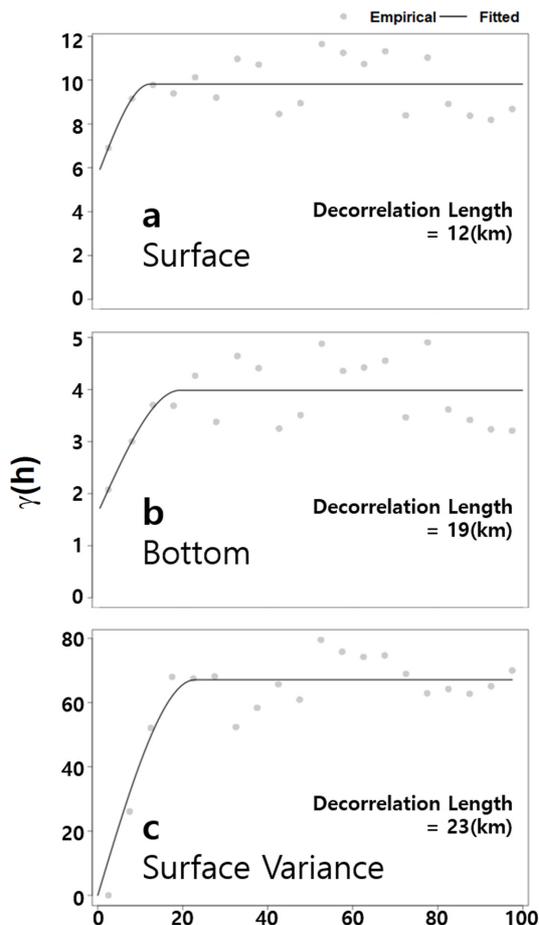


Fig. 6. Empirical and fitted variograms of surface (a), bottom (b) water salinity and variance of water salinity (c). Decorrelation lengths are 12, 19, 23 km respectively.

우도 약 19 km 이내의 상관거리를 보여 표층에 비해 비교적 완만한 변화 경향을 보였다(Fig. 6b). 분산의 공간추정에 사용된 Variogram은 Fig. 6c와 같으며, 상관거리가 약 23 km로 추정되어 평균 염분 농도를 사용한 경우보다 먼 지점까지 영향이 있는 것으로 나타났다.

자료 기반으로 추정된 공간상관 구조는 전체 관측 정점 사이의 평균적인 상관관계를 나타낸다. 복잡한 해안선으로 인해 관측점의 공간 분포 특성을 판단하는 지수(RI, Clark and Evans[1954]; K-함수, Ripley[1981])들의 계산이 어려움을 감안할 때, Variogram을 통해 추정된 상관거리는 유효 반경 내에 몇 점의 자료가 존재하는지 판단할 기준으로 활용하기 적절하다.

UK를 이용한 지점별 평균 염분의 공간 추정 결과에서는 서해중부와 서해남부 생태구의 염분이 전반적으로 낮게 나타났고, 연구 대상 영역의 외측 경계에 인접한 영역까지 약 30 psu의 낮은 염분 값을 보였다(Fig. 7a). 서남해역과 대한해협 생태구의 염분은 섬진강과 낙동강 인근 해역을 제외하면 연안 가까운 지점에서도 약 32 psu 수준을 유지했다. 동해는 약 33 psu 수준으로 전체 생태구에서 가장 높은 평균 염분을 보였지만 울산 인근 해역과 영일만 인근 해역은 높은 평균 농도에도 불구하고 비교적 큰 분산 값을 나타냈다(Fig. 7b). 대표적인 하구 해역 중 한강과 낙동강 하구의 분산 변화를 검토한 결과, 한강 하구 해역에서는 분산 5를 기준으로 나타나는 등분산선 영역이 강화도와 영종도 사이의 해역으로 나타났다(Fig. 7c). 낙동강 하구 해역에서는 같은 기준을 만족하는 영역이 가덕도와 영도 사이의 하구 해역으로 나타났다(Fig. 7d).

### 3.3 염분의 공간 경사

해역별 특성을 반영한 담수 영향 범위를 검토하기 위해 분산의 공간 경사를 검토한 결과에서는 우리나라 주요 하천(4대강 및 섬진강) 인근 해역의 담수 영향범위가 Fig. 8과 같이 나타났다. 분산 경사( $\Delta\sigma^2/\Delta s$ )는 최대 0.5 PSU<sup>2</sup>/km로, 해당 경사가 선형으로 유지된다면 분산 추정 Variogram의 문턱값인 67.1을 적용할 때 영향 범위가 약 33.6 km 수준으로 계산된다. 그러나 거리가 멀어질수록 분산 경사가 급격히 감소하므로 실제 상관거리는 더 짧을 것으로 추정된다.

따라서 유의한 영향 범위 산정을 위해 전체 영역에 대한 공간 경사를 계산하고(Fig. 8a), 분산의 경사가 큰 격자를 각각 0.25, 0.75, 0.9 분위 영역을 추출하여 변화 양상을 비교했다(Fig. 8b, Fig. 8c, Fig. 8d). 표준편차로 환산된 분산 경사의 분위수는 각각 약 0.04 PSU/km, 0.08 PSU/km, 0.14 PSU/km로 계산되며, 각각 경사의 임계값을 높일수록(0.25 → 0.9 분위) 공간 변화가 큰 해역이 선별된다. 분산 및 표준편차와 같은 염분 분산 지표의 감소는 보존성 물질의 확산 감소로 간주할 수 있으며, 시간적인 평균 농도 경사가 무시할 만한 수준으로 감소하는 것을 의미한다. 따라서 통계적 기준으로 설정된 해당 영역을 연안 영향 범위의 경계로 간주할 수 있다.

0.9 분위수 이상의 경사를 보이는 해역은 4대강과 섬진강, 형산강 인근 해역으로 나타났다(Fig. 8d). 주목할 만한 특징으로 동해 생태구 대부분의 정점과 달리 울산 연안과 영일만 인근 해역의 영향범위가 4대강 인근 해역과 비슷하게 확장된다는 점이다. 앞서 검토한

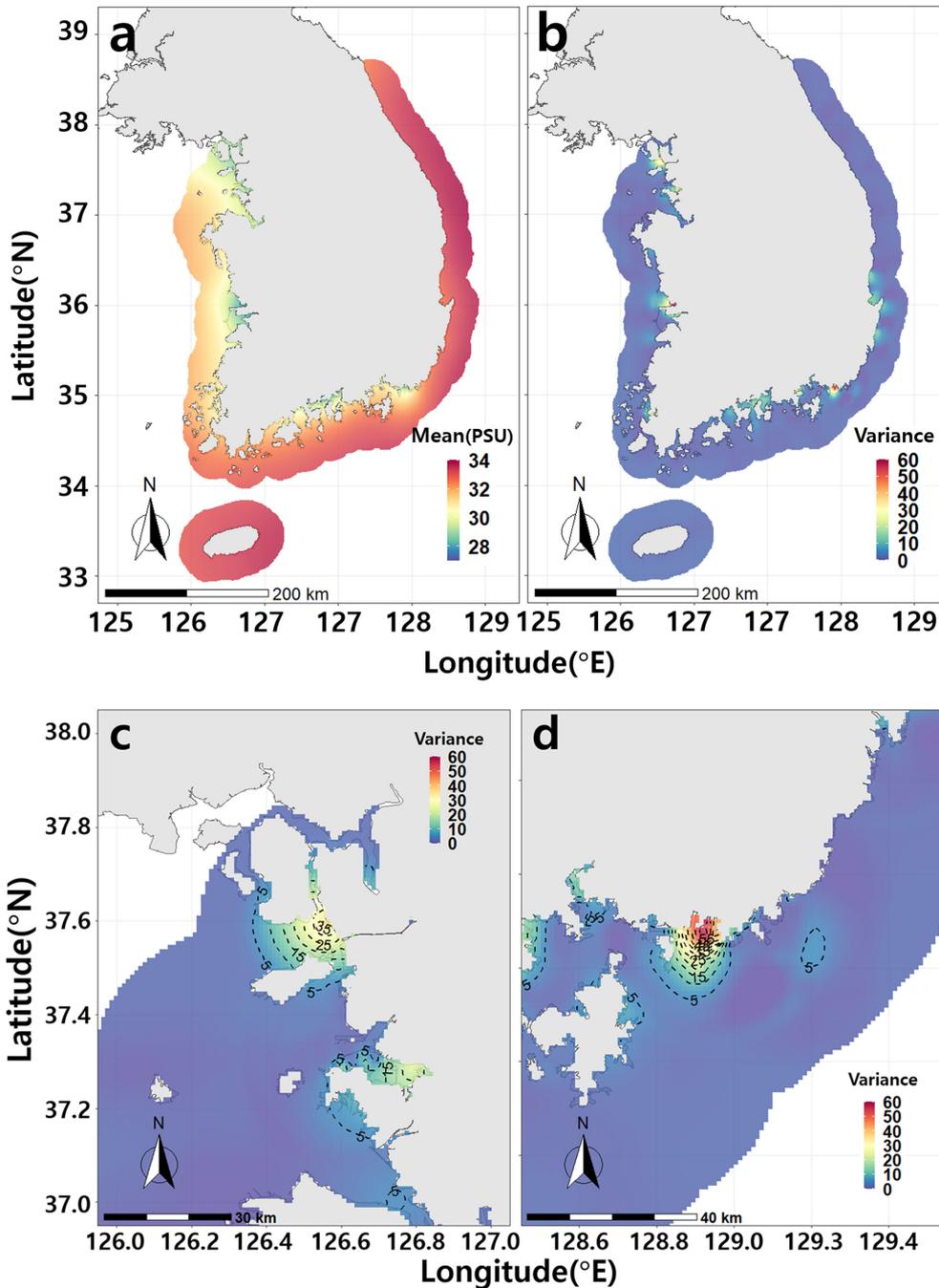


Fig. 7. Spatial estimation result of mean (a) and variance (b) of water salinity within 30 km buffer area. Universal Kriging was used. Details of the Han and Nakdong estuaries are shown in c and d, respectively.

바와 같이 동해 및 대한해협 생태구의 높은 분산 값이 공간추정 과정에서 반영된 것으로 판단되며, 평균 농도가 높은 당 해역에서 연 4회 관측 시 홍수기에 해당하는 8월의 담수 방류 영향으로 추정된다. 여기서 공통적으로 나타나는 특징은 현재 자료의 관측 정점이 영향범위로 추정되는 해역 내에서 연안 근처에 공간적으로 편향되어 있다는 점이다. 연안에서 거리가 떨어진 보조자료(국립수산과학원 정선관측자료)를 이용한 추정 결과이므로 연안 외측까지 담수 영향이 미치는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.4 해역의 변동성과 관측 정점의 분포 비교

관측망이 공간적인 염분 변화를 적절히 관측할 수 있는지 검토하기 위해 분산의 공간 경사와 관측 정점을 중첩하여 비교했다. 분산 경사 0.9 분위수 이상인 격자와 함께 현재 관측 정점을 두 집단으로 분류하여 표기했다. 23 km 이내 인접 관측 정점( $p$ )이 15점 이상인 지점을 별도로 표기했으며, 대표본(Large Sample)으로 간주한 15개 표본의 기준은 Kim *et al.*[2007]을 참고했다.

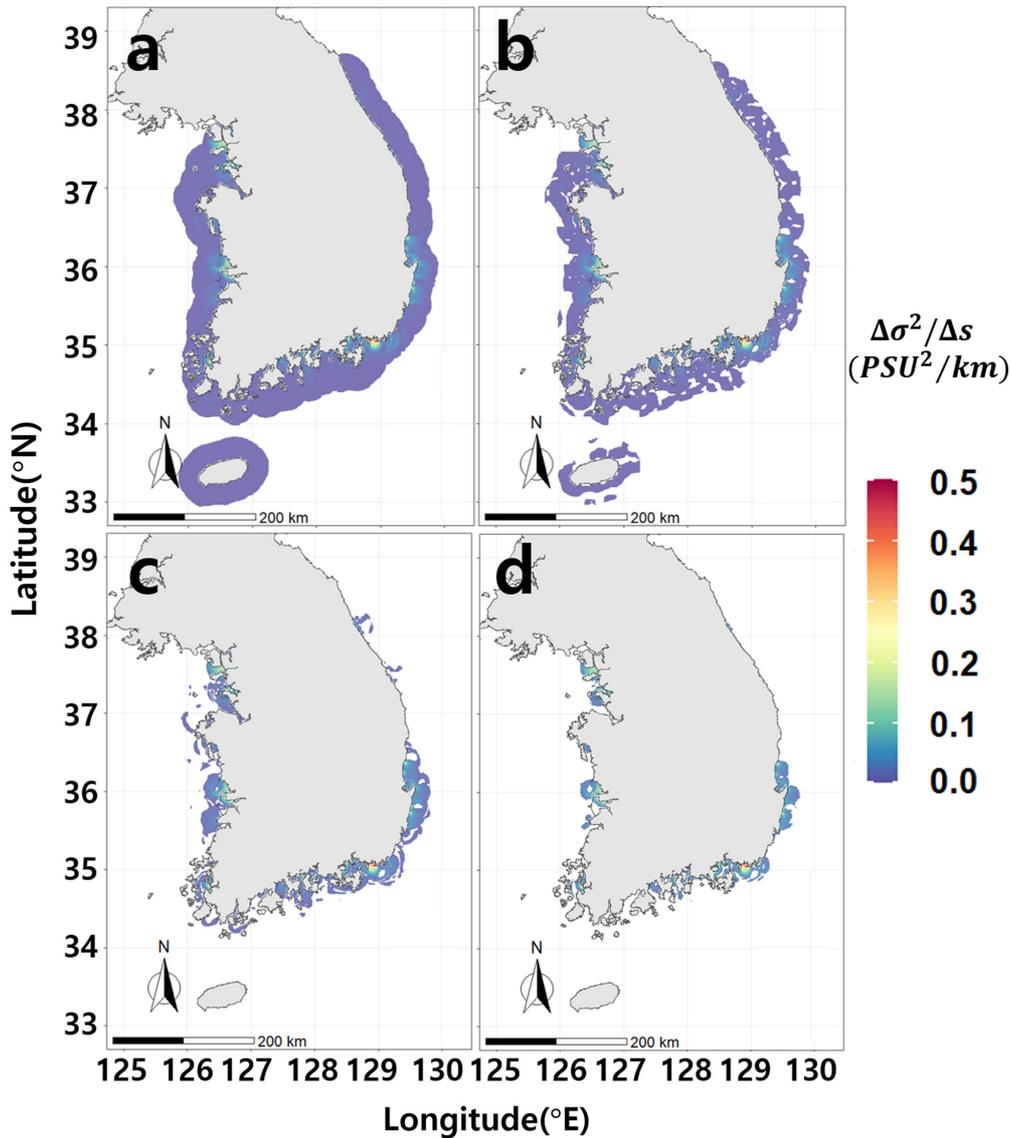


Fig. 8. Spatial slope of water salinity variance truncated by 0.0, 0.25, 0.75 and 0.9 quantiles respectively (a, b, c, d).

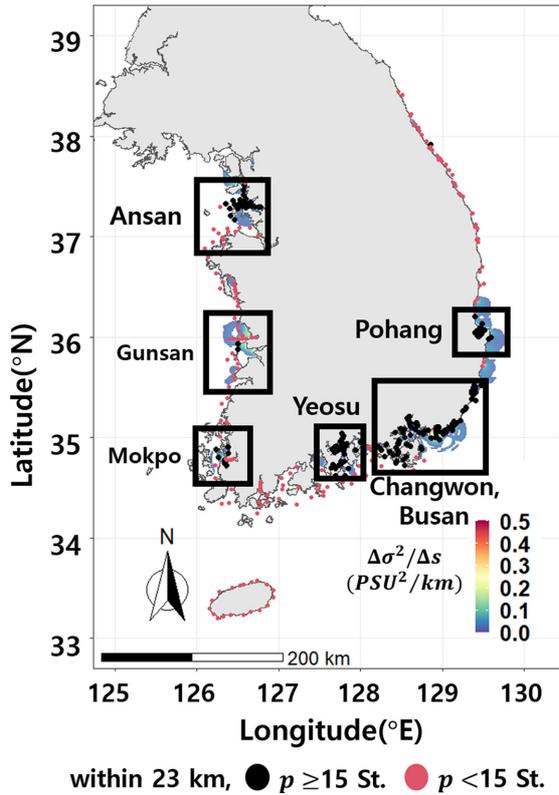
염분의 분산경사가 높게 나타나는 해역은 크게 안산, 군산, 목포, 여수, 창원, 부산, 포항 인근이며, 관측 정점 밀집 해역은 안산 시화호 내측, 여수 섬진강 하구, 창원 마산만, 부산 연안, 울산 연안 및 영일만 일부 해역으로 나타났다(Fig. 9). 23 km 내에 통계적으로 유의한 수준의 인접자료가 밀집된 정점은 시화호 인근, 광양만, 통영 인근 해역, 마산만, 낙동강 하구, 태화강 하구 및 영일만 일부 정점으로 나타났다.

금강 하구와 목포 연안은 인접한 관측 정점 수가 앞서 정의한 Large Sample 기준을 넘는 정점이 각각 2개, 8개로 서해중부 및 대한해협 생태구에 비해 상대적으로 적었다. 포항 인근 해역은 영일만 내외에 인접한 15개 정점이 해당되나, 임계치 이상의 분산 경사가 계산된 외측 해역에는 정점이 없다.

## 4. 분석의 한계 및 개선 방향

### 4.1 공간 분산 및 경사 추정 오차

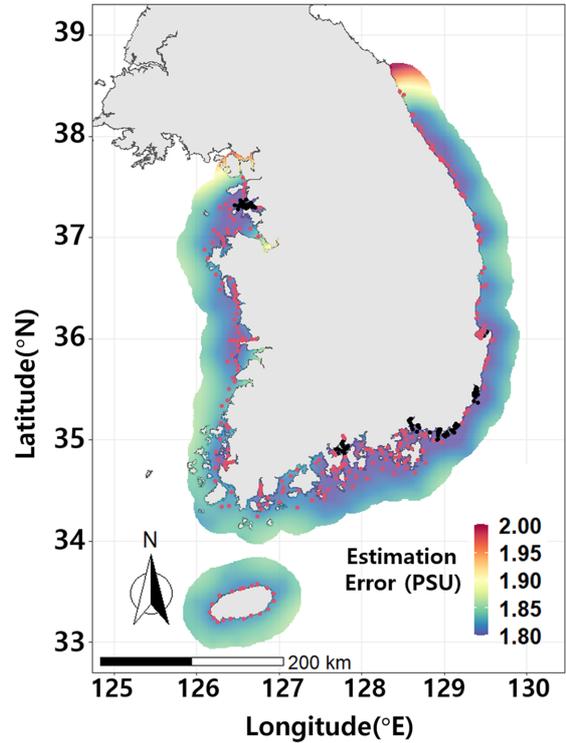
분산의 공간 변화 관점에서는, 한강의 경우 강화도 북측으로 방류되는 담수의 특성상 강화도와 영종도 북측 및 서측 해역의 염분 변화가 극심할 것으로 예상된다(Jeong *et al.*[2007], Lee *et al.*[2021]). 환경부 물환경정보시스템의 하천 유량 정보를 검토한 결과, 낙동강의 유량이 한강 대비 약 68% 수준이었으나, 낙동강 하구의 분산이 한강 하구보다 크게 나타났다(Ministry of Environment [2022]). 한강 하구에서 염분 변화가 클 것으로 예상되는 지점에 관측 정보가 없기 때문에 실제 현상과 일치하는지는 별도의 조사가 필요하다. Lee *et al.*[2003]은 수치실험을 통해 홍수기 낙동강의 담수 방류 영향이 낙동강 하구에서 남쪽으로는 거제도 북단과 동쪽으로는



**Fig. 9.** Suggested region of freshwater influence (ROFI, colored area) using spatial slope of 0.9 quantile and the observed stations. The observation points were indicated, distinguishing between points with 15 or more observations within a 23 km radius (black dots) and points with fewer than 15 observations (red dots).

영도까지 확장된다고 보고한 바 있으며 본 연구에서 제시하는 분산 확장 경향과 유사하다. 또한 부산 연안부터 울산, 포항 등 동해 연안에서 위성 관측을 통한 염분소 및 용존유기물이 봄과 여름에 높은 농도로 관측되기도 하므로 태화강, 형산강 등 지역 하천을 통해 유입되는 담수의 영향을 고려할 수 있다(Ministry of Land Infrastructure and Transport[2020]).

그러나 현재 관측 정점에서 추정할 수 있는 정보로는 정점 공백 해역의 통계적 특성 추정오차가 다른 해역에 비해 크다(Fig. 10). 특히 공간 추정된 분산의 외삽 영역은 관측 자료 기반의 변동성 정보가 없기 때문에 추정오차가 높으며 담수의 영향 범위를 확정하기도 불확실성이 크다. 추정오차 저감을 위한 원론적인 해결 방안으로는 추가 정점 배치가 필요하지만 정점 확장에 필요한 적절한 논리 구성과 타당성 확보는 자료 분석 결과만으로는 한계가 있으며, 특히 분석의 불확실성 → 추가 정점 확보 어려움 → 정보 부족으로 인한 분석의 불확실성 재현과 같이 현재 자료만으로 증명어 어려운 문제에 대하여 순환논증 오류에 빠지기 쉽다. 따라서 해당 해역에서 수행된 타 연구 자료를 확보하거나 일정 기간 동안 관측을 직접 수행하는 것이 바람직하다.



**Fig. 10.** Spatial estimation error within 30km buffer area. Universal Kriging was used. The observation points were indicated, distinguishing between points with 15 or more observations within a 23km radius (black dots) and points with fewer than 15 observations (red dots).

#### 4.2 상관거리 및 담수 영향범위 산정의 한계

3면이 바다인 우리나라의 지리적 특성으로 인해 연안 육역으로부터 외양 방향으로의 Decorelation Length를 추정하기 위해서는 해역별 이방성 Variogram 모델을 검토해야 할 것으로 판단되고, 서, 남해안의 경우 복잡한 해안선으로 인하여 실제 거리 산정에 path distance를 고려하거나 지형에 의한 Barrier 효과를 고려해야 할 수 있다(Stachelek and Madden[2015]).

또한 본 연구에서는 분산경사의 0.9분위를 기준 활용하였지만 환경변화, 자료의 공간밀도 보완과 같은 요인으로 기준의 수정이 필요할 수 있다. 임계치 결정에는 앞서 언급한 바와 같이 분석자의 주관적 판단이 개입하기 때문에, 통계에서 활용되는 검정력 개념을 응용하는 방법도 고민이 필요하다. 검정력은 자료의 수, 효과크기(Effect Size), 유의수준을 복합적으로 고려했을 때 제 2종오류가 발생할 확률이며, 요구되는 검정력을 확보하기 위한 자료 수와 효과크기는 자료에 따라 변한다(Lehr [1992]). 정규분포를 따르는 자료에 대하여 이론적으로 유도되었다는 점에서 직접 적용하는 데에는 한계가 있지만 자료의 통계적 특성에 따라 요구되는 임계치가 변할 수 있는 점은 Monte Carlo simulation 기법 등을 응용하여 차용할 만한 개념이다.

통계적인 기준 외에도 연안의 육상 영향 범위 설정에는 다양한 기준이 논의되어야 하며, 특히 담수의 영향범위에서 그치지 않고 다른

관측 항목을 함께 고려할 수 있다. 해안공학 분야의 경우, 주요 관심 항목인 파랑과 이에 영향을 받는 지형 변화를 중심으로 연안의 영역을 분할하는 세부 기준들이 제시되어 있다(Hallermeier[1981]; Hallermeier[1983]; Coastal Engineering Research Center[1984]). 마찬가지로 해양환경 분야에서도 육상에서 해양으로 유입되는 영양 염에 의한 부영양화와 이로 인한 엽록소 농도의 변화는 수질 항목의 영향범위를 정량화 하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 4.3 연안범위와 정점 관리 제한

표준오차의 경우  $\sigma/\sqrt{n}$  과 같이 계산되므로 표본 수  $n$ 이 증가할수록 감소하며, 분산을 이용한 통계적 추정에는 표본 수에 따른 오차저감 효과가 내재되어 있다고 볼 수 있다. Kriging을 비롯한 공간 추정 기법 역시 마찬가지이며, 표본을 무한히 증가시키는 것이 오차를 줄이는 가장 확실한 방법이지만 해양 관측 정점의 확장은 시간과 비용 측면에서 많은 한계가 있다. 앞선 결과로부터, 담수와 같은 육상 기원 영향이 나타나는 공간적 범위가 해역별로 상이함을 볼 수 있었기 때문에, 연안 관측 정점의 배치는 특정 해역에 골고루 분포하는 것이 아니라 관측 대상 항목의 공간 분산에 따라 불균질하게 배치하는 것이 더 타당함을 추론할 수 있다. 예를 들어, Fig. 11은 분산의 공간적인 변화율을 가중치로 하여 분석에 사용한 352개 정점을 Weighted Random Sampling 기법으로 지정한 것이다. 현재 관측 정점과 비교하여 분산 경사가 큰 해역에 정점이 집중되는 경향이 있으며, 이 외의 해역에서는 경계로 부여한 30 km 이내 해역에서 무

작위로 분포한다. 동해안의 경우 육상 영향 범위가 해안선에서 매우 가깝기 때문에 해안선에서 먼 거리에 할당된 정점이 부적절할 수 있으나, 기존 관측 자료에서 보이는 낮은 변동성은 해당 해역에 대한 관측 소요가 낮으므로 최소한 통계적인 기준으로 의미 있는 관측 정점은 아니다. 다수의 선행연구들에서는 공간 표본 및 분포에 따른 Kriging 기법의 추정오차 변화에 대한 연구들을 수행했고, 특정 자료의 특성에 따라 관측 정점의 최적 공간 분포가 완전히 무작위(Random)이거나 균질(Uniform)하지 않을 수 있음을 시사했다(Yfantis et al.[1987]; Xiao et al.[2005]; Brus and Heuvelink[2007]; Oliver and Webster[2014]). 염분 분산의 공간 변화율이 낮은 해역의 정점에 투입되는 자원을 변화율이 높은 해역에 투입하는 재배치하는 방법을 고려해볼 수 있으나, 고정 관측을 통한 시계열 분석이 불가능한 부작용이 발생한다. 따라서 가능한 여건에서 분산 경사가 큰 해역에 관측 정점을 추가하여 관측 공백을 보완하는 방법이 현실적인 대안이다. 또한 시화, 마산과 같이 과거 심각한 오염에 대한 지속적 모니터링이 필요한 해역에 대해서는 정성적인 평가를 통해 관측 정점의 집중도를 유지하는 것이 타당해 보인다.

## 5. 요약 및 결론

해양환경관측망 염분 자료를 이용하여 연안 해역에서 담수의 영향 범위를 통계적으로 제시하였다. 1997년부터 2021년까지 25년간의 관측 자료를 이용하여 정점별 분산을 구하고, Universal Kriging 기법을 이용하여 분산의 공간분포를 추정했다. 염분의 분산은 해역별 담수의 영향을 판단하는 지표로 사용했으며, 염분 분산의 공간 경사를 이용해 담수의 영향 범위를 제시했다. 본 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

1. 연안의 정의는 다양하나, 해양환경 관점에서의 정량적 연안역 획정 연구가 미흡하다.
2. 해역에 따라 평균 및 분산의 변화 경향이 다르며, 배경 특성이 달라도 분산의 공간경사 지표는 해역별 특성이 반영된 변동성 지표로 활용 가능하다.
3. 우리나라 연안 환경에서 담수 영향 범위를 확정하는 기준으로 연안 염분 표준편차 경사  $\Delta\sigma/\Delta s \geq 0.14(\text{PSU}/\text{km})$ 를 제시하였다. 본 연구에서는 영향 항목을 염분으로 제한하고 분산 경사의 임계치는 통계적인 경험법칙을 이용하여 제시했으나, 향후 임계 수준의 정량화 및 다양한 관측 항목을 고려한 기준에 관한 논의가 필요하다.
4. 분산 경사와 현행 관측 정점을 함께 검토했을 때, 분산 경사가 큰 해역에서 정점의 공백이 존재한다. 추후 담수 확산 범위의 추정 기법 고도화 및 관측 정점의 적절성 평가를 통해 정밀한 조정이 가능할 것으로 판단된다.

염분의 분산 변화가 극심한 해역의 특성 분석에서 연안 가까운 해역의 정점 밀도에 비해 담수 확산이 예상되는 외측 해역의 관측 밀도가 현저히 낮거나 관측 정점이 없는 것으로 나타났다. 이를 종합하면 현재 공간적인 분산이 큰 해역의 조밀한 관측망을 유지하면서 본 연구에서 제시한 공간적인 분산 경사가 큰 해역에서 분산 확산

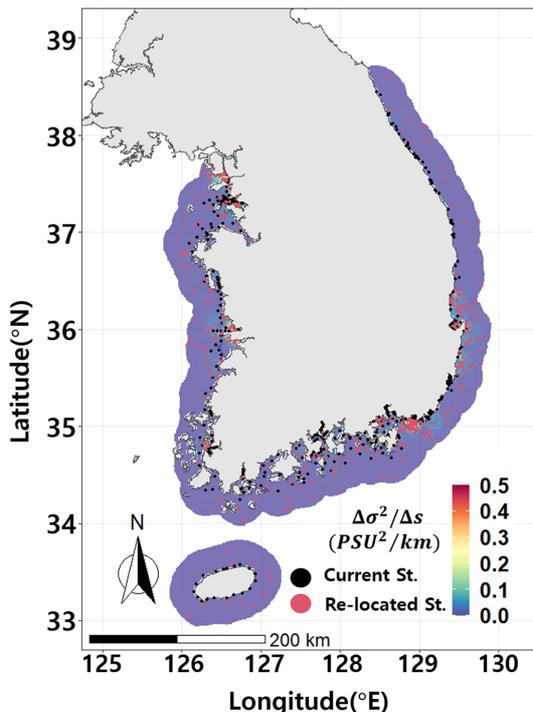


Fig. 11. Stratified random sampled observation points within 30 km buffer area (red dots, n=352) and current observation points (black dots, n=352). The spatial slope was used as weighting factor.

방향으로의 정점 확장이 필요한 것으로 판단된다. 본 연구를 기반으로 현재 관측 정점의 공간적 적절성을 정량적으로 검토할 수 있으며, 관측망의 효율적 조정 및 관리를 위한 정보로 활용할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2022년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-해양유해물질오염원 추적기법개발 사업과 독도의 지속 가능한 이용연구(PG-53502) 사업 지원을 받아 수행된 연구입니다. 또한 본 연구에서 사용한 관측 자료를 제공해 준 KOEM(해양환경공단)에 감사를 드립니다.

## References

- [1] Acuna, E. and Rodriguez, C. 2004, The treatment of missing values and its effect on classifier accuracy. In Classification, clustering, and data mining applications. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Brus, D.J. and Heuvelink, G.B. 2007, Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1-2), 86-95.
- [3] Cho, H.Y., Cho, B.J. and Kim, S.J. 2008, Estimation on the Regions of Freshwater Influence using the Seasonal Salinity Data in Asan Bay Coastal Zone. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 20(2), 219-231.
- [4] Clark, I. 1979, Practical geostatistics. London: Applied Science Publishers.
- [5] Clark, P.J. and Evans, F.C. 1954, 'Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations', *Ecology*, 35(4), 445-453.
- [6] Coastal Engineering Research Center (US). 1984, Shore protection manual (Vol. 1). Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
- [7] Cowles, M. and Davis, C. 1982, On the origins of the .05 level of statistical significance. *American Psychologist*, 37(5), 553.
- [8] Cressie, N. 1991, Statistics for spatial data. John Wiley & Sons.
- [9] Doney, S.C., Glover, D.M., McCue, S.J. and Fuentes, M. 2003, Mesoscale variability of SeaWiFS satellite ocean color: Global patterns and spatial scales. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C2).
- [10] Garcia, H.E., Boyer, T.P., Locarnini, R.A., Baranova, O.K. and Zweng, M.M. 2018, World ocean database 2018: User's manual (prerelease). NOAA Atlas NESDIS81.
- [11] Hallermeier, R.J. 1981, A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate. *Coastal Engineering*, 4, 253-277.
- [12] Hallermeier, R.J. 1983, Sand Transport Limits in Coastal Structure Design, Proceedings, Coastal Structures '83, American Society of Civil Engineers, pp. 703-716.
- [13] Hengl, T., Heuvelink, G.B. and Stein, A. 2003, Comparison of kriging with external drift and regression kriging. Enschede, The Netherlands: ITC.
- [14] Horn, B.K. 1981, Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14-47.
- [15] Horner-Devine, A.R., Hetland, R.D. and MacDonald, D.G. 2015, Mixing and transport in coastal river plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47, 569-594.
- [16] Kim, W.C., Kim, J.J., Park, B.W., Park, S.H., Park, T.S., Song, M.S., Lee, S.Y., Lee, Y.J., Jeon, J.W. and Cho, S.S. 2007, Introduction to Statistics. 4th edition, Yeongji Publishers.
- [17] Jeong, J.H., Kim, K.J., Yang, K.H., Chang, Y.Y., Park, S.H. and Kim, Y.T. 2007, Study on the Temporal and Spatial Variations of Salinity by Freshwater Discharge in Gyeonggi Bay. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 16(6), 421-432.
- [18] Jung, T.S. and Kim, T.S. 2008, Prediction System of Hydrodynamic Circulation and Freshwater Dispersion in Mokpo Coastal Zone. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 11(1), 13-23.
- [19] Kang, J.H., Kim, Y.S., Park, S.J. and So, J.K. 2009, 3-D Applicability of the ESCORT Model - Simulation of Freshwater Discharge. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 21(3), 230-240.
- [20] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Ocean Data in Grid Framework, <http://www.khoa.go.kr/oceangrid>, 2022 (accessed 2022.11.01).
- [21] Korea Marine Environment Management Corporation Marine Environmental Information System, <https://www.meis.go.kr>, 2022 (accessed 2022.11.01).
- [22] Lee, H.M., Song, J.I., Kim, J.W., Choi, J.Y., Yoon, B.I. and Woo, S.B. 2021, Numerical Modeling for Region of Freshwater Influence by Han River Discharge in the Yeomha Channel, Gyeonggi Bay. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 33(4), 148-159.
- [23] Lee, J.S., Yoon, E.C., Baek, S.W. and Lee, J.C. 2003, Three-Dimensional Behavior of Nakdong River Plume during the Flood Period in Summer. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 36(5), 549-561.
- [24] Lee, M.O. and Moon, J.H. 2008, Marine Environments in the Neighborhood of the Narodo as the First Outbreak Region of *Cochlodinium polykrikoides* Blooms. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 11(3), 113-123.
- [25] Lee, Y.S., Ha, K.J. and Jeon, E.H. 2004, Climatological Boundary and Characteristics of Coastal Zone over the Southwestern Korean peninsula. 'The Sea', *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 9, 137-170.
- [26] Lehr, R. 1992, Sixteen S-squared over D-squared: A relation for crude sample size estimates. *Statistics in medicine*, 11(8), 1099-1102.
- [27] Liu, S., Pan, Y.F., Li, H.X., Lin, L., Hou, R., Yuan, Z., Huang, P., Cai, M.G. and Xu, X.R. 2022, Microplastic pollution in the surface seawater in Zhongsha Atoll, South China Sea. *Science*

- of The Total Environment, 822, 153604.
- [28] Matheron, G. 1969, 'Le krigeage universel (Universal kriging), Vol. 1', Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 83.
- [29] Ministry of Environment, Water Environment Information System, <https://water.nier.go.kr>, 2022 (accessed 2022.11.01).
- [30] Ministry of Government Legislation, Korea Law Information Center, <https://www.law.go.kr/> Coast Management Act Article 2 Subparagraph 2, 2022 (accessed 2022.11.01).
- [31] Ministry of Land Infrastructure and Transport. 2020, The National Atlas of Korea II.
- [32] National Institute of Fisheries Science, Korea Oceanographic Data Center, <https://www.nifs.go.kr/kodc>, 2022 (accessed 2022.11.01)
- [33] Oliver, M.A. and Webster, R. 2014, A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69.
- [34] Park, M.O., Lee, Y.W., Park, J.K., Kim, S.G., Kim, S.S. and Lee, S.M. 2018, Changes in Water Quality in Masan Bay after the Introduction of the Total Pollution Load Management System. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 21(2), 139-148.
- [35] Park, M.Y., Song, J.Y., Han, I.S. and Lee, J.S. 2019, A Study of Long-term Trends of SST in the Korean Seas by Reconstructing Historical Oceanic Data. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 25(7), 881-897.
- [36] Prouty, N.G., Cohen, A., Yates, K.K., Storlazzi, C.D., Swarzenski, P.W. and White, D. 2017, Vulnerability of coral reefs to bioerosion from land-based sources of pollution. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 9319-9331.
- [37] Ripley, B.D. 1981, *Spatial statistics*. John Wiley & Sons.
- [38] SEDAC, CSD coastal population indicator: data and methodology page. Socioeconomics and data and applications center, <http://sedac.ciesin.columbia.edu/es/csdcoastal.html>, 2011 (accessed 2022.11.01)
- [39] Simpson, J.H. 1997, Physical processes in the ROFI regime. *Journal of marine systems*, 12(1-4), 3-15.
- [40] Stachelek, J. and Madden, C.J. 2015, Application of inverse path distance weighting for high-density spatial mapping of coastal water quality patterns. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(7), 1240-1250.
- [41] Wang, Y., Liu, G., Yu, G., Zhao, Z., Hu, G. and Liu, D. 2021, Evaluation of the spatial heterogeneity in marine organic pollution and land-based influencing factors: A case study of the marine area of Laizhou Bay, China. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101867.
- [42] Won, J.H., Lee, Y.W., Kim, S.J. and Kim, S.G. 2019, Status and Developmental Direction of Persistent Pollutants Survey on Marine Ecosystems of Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 22(3), 142-150.
- [43] Xiao, X., Gertner, G., Wang, G. and Anderson, A.B. 2005, Optimal sampling scheme for estimation landscape mapping of vegetation cover. *Landscape Ecology*, 20(4), 375-387.
- [44] Yfantis, E.A., Flatman, G.T. and Behar, J.V. 1987, Efficiency of kriging estimation for square, triangular, and hexagonal grids. *Mathematical Geology*, 19(3), 183-205.
- [45] Zhao, W.L., Yang, S.Y., Wang, J., Xiao, J.M., Lu, X.X., Lin, J., Huang, P. and Cai, M.G. 2015, Load estimation and assessment of land-based pollution for Quanzhou Bay and their relevance to the Total Quantity Control of Pollutants Discharged into the Sea (TQCPS) Program in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 166, 230-239.

---

Received 22 November 2022

1st Revised 2 February 2023, 2nd Revised 27 April 2023

3rd Revised 2 August 2023

Accepted 4 August 2023

**Appendix**

$$\lambda = \begin{bmatrix} C & I_n & X \\ I_n^T & 0 & \mathbf{0}_m \\ X^T & \mathbf{0}_m^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_0 \\ 1 \\ X_0 \end{bmatrix}$$

식 (2)의 분할행렬 구성 및 행렬 크기

$$\lambda = \begin{bmatrix} w \\ \phi \end{bmatrix}; w = [w_1 w_2 w_3 \dots w_n]^T; \phi = [\phi_0 \phi_1 \phi_2 \dots \phi_m]^T$$

여기서,  $\lambda$ 는 식 (2)를 통해 구하고자하는 각 관측값에 대한 결합 가중치 벡터이며,  $w$ 와  $\phi$ 로 구성된다.  $w$ 는 관측자료에 대한 결합 가중치  $w_i(i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 이며  $\phi$ 는 Lagrange Parameter  $\phi_k(k = 1, 2, \dots, m)$ 이다.

$$C = Var(z_i) = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) \end{bmatrix}; (n \times n)$$

$$C_0 = Var(z_i) = \begin{bmatrix} \gamma(h_{01}) \\ \gamma(h_{01}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{0n}) \end{bmatrix}; (n \times 1)$$

여기서,  $C$ 는 관측분산( $Var(z_i)$ )에서  $\gamma(h_{ij})$ 를 뻤 값이며,  $C_0$ 는  $\gamma(h_{0i})$ 을 뻤 값이다.  $h_{ij}$ 와  $h_{0i}$ 는 각각 관측자료 사이의 거리행렬과 추정대상 지점과 관측 지점사이의 거리를 의미한다( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}; (n \times m)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ \vdots \\ x_{0m} \end{bmatrix}; (m \times 1)$$

여기서,  $X$ 는 관측 지점의 좌표이며,  $X_0$ 는 추정대상 지점의 좌표이다.  $X$ 는 각 관측 값의 공간좌표이며 기중 결합 시 공간적인 추세를 반영하는 제약조건으로 작용한다. 자료의 수가  $n$ 개 이고, 보간 대상 차원이  $m$ 차원인 경우  $n \times m$  행렬이 된다.  $x_{0k}(k = 1, 2, \dots, m)$ 는 추정하고자 하는 대상 지점의 좌표를 의미한다.

행렬  $I_n, \mathbf{0}_m, \mathbf{0}$ 은 각각 1행렬과 0행렬로 다음과 같다.

$$I_n = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}; (n \times 1)$$

$$\mathbf{0}_m = [00 \dots 0]; (1 \times m)$$

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}; (m \times m)$$

모든 인자들을 표기한 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \phi_0 \\ \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1n}) & 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2n}) & 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(h_{n1}) & \gamma(h_{n2}) & \dots & \gamma(h_{nn}) & 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1m} & x_{2m} & \dots & x_{nm} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma(h_{01}) \\ \gamma(h_{02}) \\ \vdots \end{bmatrix}$$