



금강하구역에서 최소 정점을 이용한 TS 공간 분포의 재구성

김남훈^{1,†} · 황진환²

¹서울대학교 건설환경공학부 대학원생

²서울대학교 건설환경공학부 부교수

Reconstruction of TS Spatial Distribution using Minimum Points in Geumgang Estuary

Nam-Hoon Kim^{1,†} and Jin Hwan Hwang²

¹Ph. D Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Associate professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요 약

연안의 물리 및 환경 특성은 조석, 파랑, 담수 방류 등과 같이 다양한 요인에 의해 변화한다. 특히, 금강하구는 강우에 의한 하구둑 내부 수위의 변화로 인위적인 담수 방류가 이루어지기 때문에 해수와 담수가 서로 혼합되어 담수 영향역의 변화가 매우 큰 해역이다. 이러한 담수 영향역의 변화는 연안의 물리 및 환경 변화에 영향을 미칠 수 있어, 이를 효과적으로 관리하기 위한 모니터링이 수행되어야 한다. 하지만 해역의 특성을 효과적으로 반영하고 관리하기 위한 모니터링 정점의 개수와 위치 등을 결정할 수 있는 방법론은 아직 제안된 바가 없어, 연구자의 경험과 판단에 의존하여 모니터링 정점의 설계가 이루어지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 금강하구역을 대상으로 모의된 수치 모델(Delft-3D) 자료를 이용하여 담수에 의한 공간 변동성을 반영할 수 있는 모니터링 정점의 배열 설계 전략을 공학적으로 제시하였다. 분석 항목의 시·공간 특성 변화를 재구성하기 위해서 공간 분포를 연속적으로 구성할 수 있는 객관 분석의 보간 함수를 목적 함수로 구축하고, 이를 특정 설계 영역 안으로 구속시켜 국소 혹은 전역 최소 및 최대치를 찾아주는 구속 최적화 방법을 도식적으로 적용하였다. 이렇게 재구성된 최적점의 배열을 이용하여 공간 분포를 재구성하고, 참값과 비교하여 적정성 여부를 평가하였다. 또한, 현재 금강하구에서 운영되고 있는 모니터링 정점의 배열과 비교하여 방법론의 타당성 여부를 평가하였다. 최적점의 배열은 현재 금강하구에서 운영되고 있는 모니터링 정점 배열보다 반 이상 적은 정점으로도 유사한 결과를 보였으며, 공간 분포를 연속적으로 구성하기 위한 합리적인 위치에서 결정되었음을 시사하였다.

Abstract – The physical and environmental characteristics of the coastal area can be affected by the various factors such as tide, wave, and freshwater discharge. In particular, The Geumgang estuary is artificially discharging the freshwater according to the change of water level in the reservoir due to the rainfall, so that the seawater and freshwater are mixed with each other and the freshwater influence area change a lot. Therefore, the physical and environmental conditions of the coastal area may change, and the appropriate monitoring should be carried out to manage them effectively. However, no standard method or framework has yet been proposed to determine the number and location of monitoring points, which effectively represent and manage the characteristics of the coast. In this study, we propose an array design strategy of monitoring number and locations that can represent the spatial variability of the freshwater using the numerical simulation results for the Geumgang estuary. In order to reconstruct the temporal and spatial characteristics of target variables, an interpolation function that can construct the continuous spatial distribution is constructed for the objective analysis. An optimization method which can constrain the objective function into the specific design domain is graphically applied to find the local or global minimum and maximum solutions. The spatial distribution is reconstructed by using the solutions and compared it with the true distribution to evaluate its reconstruction capacity. In addition, the methodology is validated by comparing with the observation data from the monitoring points, which are currently being operated in the Geumgang estuary. The spatial distribution of the best-fitted array is similar to that of the

[†]Corresponding author: nhkim426@gmail.com

currently operating array with less than half of the number of points in the Geumgang estuary, and suggesting that the best-fitted array is determined at the reasonable locations to reconstruct the continuous spatial distribution.

Keywords: Geumgang estuary(금강하구), Array design(배열 설계), Objective analysis(객관 분석), Graphical optimization(도식 최적화), Constrained optimization(제약 최적화)

1. 서 론

금강하구는 강우량에 따른 하구둑 내부의 수위와 외부 조석에 의한 비정기적 방류로 인해 해수와 담수가 서로 혼합되어 담수 영향역의 변화가 매우 큰 해역이다(Jang and Hwang[2013]). 이에 따라 물리적으로 해역의 성층 및 혼합 특성 변화를 초래할 뿐만 아니라(Hwang *et al.*[2014]; [2017]; Jang *et al.*[2012]; Kim *et al.*[2016]; [2018a]), 환경적으로 예상치 못한 영양분 불균형을 초래하여 조류의 용존 산소 소비량의 증가에 따른 부영양화로 적조 등을 유발할 수 있다(Alcock[2007]; Kim *et al.* [2018c]; Pierce and Henry[2008]). 이러한 변화를 파악하고 대비하기 위해서는, 적절한 관측망이 구축되어 관리 및 운영되어야 한다. 일반적으로 해역의 변화를 파악하기 위해서는 정기적인 현장 모니터링(샘플링)을 수행한다. 많은 연구자들이 정기적 혹은 비정기적으로 현장에서 모니터링을 수행해 왔다(Jeong *et al.*[2005]; Kim and Kang[2002]; Lee *et al.*[1999]; Shin[2013]). 하지만, 해역의 특성 변화를 효과적으로 반영하고 관리하기 위한 적정 모니터링 정점의 개수와 위치를 결정할 수 있는 설계 전략이 미비한 실정이다(Kim *et al.*[2018c]). 또한, 실제 현장에서는 정해진 시간과 공간적 범위 안에서 모니터링을 수행해야 하기 때문에, 어느 위치에서 몇 개의 정점을 적절히 배열해야 하는지에 대한 결정의 어려움이 있다. 따라서, 제한된 수의 정점으로 해역의 공간적 특성을 충분히 나타내기 위한 배열 설계 전략의 개발이 필수적이다.

정점 모니터링의 배열을 설계해야 하는 근본적인 목적 중 하나는 분석하고자 하는 변수를 공간적으로 가장 잘 시각화하기 위함이다. 특히, 시각화된 공간 분포는 정점을 어떻게 배열하는지에 따라서 그 정확도가 달라지게 된다. Bretherton *et al.*[1976]은 과거 기상 연구에서 개발한(Gandin[1965]) 최적 보간 기법인 객관 분석(Objective Analysis, OA)을 이용하여 공간 분포를 재구성하였고, 이를 바탕으로 모니터링 정점 배열을 반복적으로 조정하며 참값에 근접하도록 배열을 설계하였다. 이러한 시행착오 기법은 연구자의 경험과 직관에 기반하여 반복적으로 배열을 구성하기 때문에, 공간 분포를 가장 잘 재구성할 수 있는 몇가지의 배열이 고려되지 않을 수도 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 공분산 함수를 목적 함수로 구축하여 이를 최소화 하기 위한 목적으로 모의 담금질(Simulated Annealing, SA) 및 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 같은 최적화 기법을 적용하여 공간 분포를 가장 잘 재구성할 수 있는 배열을 설계하는 연구가 제안되었다(Barth and Wunsch[1990]; Barth [1992]). Hernandez *et al.*[1995]은 GA를 이용하여 표류자(Drifter) 배열을 설계하였으며, 이를 직관적으로 균일하게 배열하여 설계한 그들의 선행 연구 결과(LeTraon and

Hernandez[1992])와 비교하였다. 최적화 기법을 도입하여 설계한 배열의 공간 분포는 직관적으로 균일하게 설계한 배열의 공간 분포보다 참값에 가까운 결과를 도출 해 내었다. 이러한 공간 분포 재구성을 위한 최적화 문제는 해면 고도를 측정하기 위한 계류 위치 설계(Hackert *et al.*[1998]) 및 북대서양 해류를 모니터링하기 위한 센서의 배열 설계(Baehr *et al.*[2004]) 등 다양한 분야에서 연구가 수행되어 왔다. 하지만, 앞서 수행된 선행 연구들은 대부분 대규모 해양(>5000 km)을 대상으로 공간 분포의 오류를 최소화하기 위한 배열 설계 최적화를 수행해 왔다. 일반적으로, 대규모 해양에서 보고자 하는 매개변수 특성들(e.g. 수온, 염분 등)은 하구와 같은 소규모 해역(<50 km)보다 공간적으로 작은 변동성을 가지고 있어 공간 분포를 재구성하기 위한 배열 설계의 최적화에 이점을 가지고 있다(Rogowski *et al.*[2012]). 때문에, 대규모 해역에서 적용되어 오던 최적화 기법을 본 연구에서 대상으로 하는 금강하구와 같은 소규모 해역에 적용하였을 경우 매개변수의 공간적인 변동성을 충분히 반영할 수 없다. 또한, 선행 연구들에서 사용된 목적 함수는 공분산 혹은 평균제곱근오차 등과 같이 정량적인 목적 함수를 구축하였기 때문에 최적화를 위해 긴 계산 소요 시간이 요구될 뿐만 아니라 정량적인 목적 함수의 결과가 지역해에 빠져들 우려가 있어 설계된 배열이 최적해임을 증명할 수 있는 수단이 없다는 단점이 있다(Kim *et al.*[2018c]).

본 연구에서는 금강 하구와 같은 소규모 해역에서 매개변수의 변동성을 충분히 반영하기 위한 공간 분포를 재구성하기 위해, 최적 보간 기법 중 Barnes[1964]가 제안한 객관 분석(Barnes Objective

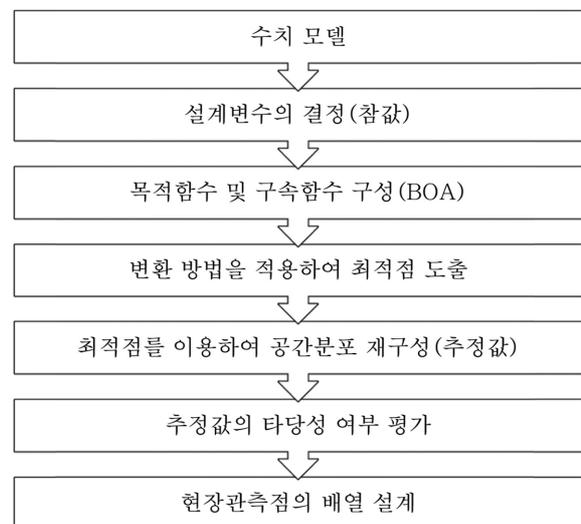


Fig. 1. Schematic diagram of research procedure.

Analysis, BOA)으로 목적 함수를 구축하여 도식 최적화(Graphical Optimization)를 수행하였으며, 이를 기반으로 모니터링 정점 배열을 설계하는 방법론을 제안하고자 한다(Fig. 1). 이는 정량적인 목적 함수를 사용하지 않고 공간 분포를 연속적으로 가장 잘 표현할 수 있는 정점의 배열을 직접 선택하기 때문에, 지역해에 빠져들 우려가 없으며 금강 하구와 같이 담수 방류에 의한 공간 변동성이 큰 해역에 충분히 반영할 수 있다. 연속적인 공간 분포 상에서 모니터링 정점 배열을 설계하기 때문에, 배열의 정점이 육지와 구조물 내에서 선택되지 않도록 제약 함수(Constrained function)를 도식적으로 구축하여 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 수치 모델

본 연구에서는 모니터링 정점 배열 설계를 위해, Cho *et al.*[2016]이 수행한 수치 모의 자료를 활용하였다. 현장 관측 자료를 기반으로 설계를 할 경우, 서로 다른 위치에서 측정된 결과가 시·공간적으로 동일하다고 보기 어렵기 때문이다. 예를 들어, 실제 현장에서 서로 간의 거리가 2-3 km인 28개 정점에서 자료를 수집할 경우, 관측에 약 3시간 이상이 소요되어 실제로 보고자 하는 중요한 시·공간 변화를 놓칠 가능성이 있다(Kim *et al.*[2018c]). 반면, 수치 모델 자료는 충분한 시·공간 해상도를 반영할 수 있어 배열을 설계하기 위한 기반 자료로 활용이 가능하다. 수치 모델은 황·동중국해 광역 모델로부터 다운스케일링을 수행하였으며, 금강 하구에 대한 상세역 모델은 x방향 약 107 km, y방향 약 124 km 크기에 대해서 수행되었다(Cho *et al.*[2016]). 격자 간격은 90-4,240 m인 직교 곡선 격자 체계이며, 1시간 간격으로 모델 결과를 추출하였다. 여기서, 배열 설계를 위해 Fig. 2에 해당하는 영역의 수치 모델 결과(수온 및 염분)를 추출하여 입력 자료로 활용하였다. 수치 모델의 재현성에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 수리 및 수질 특성에 대한 검·보정이 수행되었으며, 본 연구에서 주로 다룰 수온과 염분에 대한 검·보정률은 약 86.5%이상 확보하였다(Cho *et al.*[2016]).

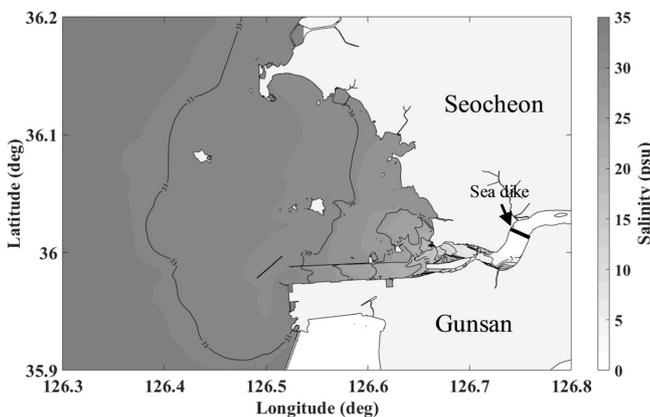


Fig. 2. The numerical simulation results in Geumgang Estuary.

2.2 목적 함수의 구축

대상 해역의 공간 분포 상에서 모니터링 정점 배열 설계를 위한 최적점을 찾기 위해서는, 입력 자료(수온 및 염분)의 공간 분포를 연속적으로 표현할 수 있는 목적 함수가 필요하다. 이러한 공간 분포를 표현할 수 있는 연속 함수로는 보간 기법의 주 함수가 있을 수 있는데, 흔히 쓰이는 1차 혹은 고차 선형 보간 기법은 관측치가 존재하지 않는 바깥 경계역을 따로 외삽해야 하기 때문에 이로 인한 경계역에서의 오류가 증폭될 수 있으며(Barth *et al.*[2008]), 최적점을 찾기 위한 목적 함수의 구성이 복잡해 질 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 단일 함수만으로 공간 분포를 연속적으로 보간할 수 있는 Barnes[1964]가 제안한 객관 분석(BOA)의 주 함수를 목적 함수로 적용하였다. BOA는 거리 가중 함수를 가중치로 두어 공간적으로 발생할 수 있는 불연속성과 경계역에서의 오류를 최소화한 최적 보간 기법이다. 특히, 아주 적은 개수의 정점이 불규칙적으로 배열되었다 할지라도 이 거리 가중 함수를 두 번 이상의 루프로 반복 적용하여 대상 영역 전체의 공간 분포를 고해상도로 지도화 할 수 있다는 장점이 있다(Koch *et al.*[1983]; Spencer *et al.*[1999]). 여기서, BOA가 최적 보간 기법이라 불리는 이유는 각 그리드에서의 값을 보간 하고자 할 경우 모든 참조점에서의 값이 반영되어 보간 값이 과소 혹은 과대 산정될 가능성이 있어, 이러한 문제점을 극복하기 위해 두 번 이상의 루프를 반복 적용하여 보간 값을 보정하는 것이다(Koch *et al.*[1983]).

BOA 기법에서, 변수 $f(x_m, y_m)$ 는 m 번째 위치에서의 참조 값이라면, 그리드에서의 각 루프 보간 값은 다음과 같다.

$$f^1(x, y) = \frac{\sum_{m=1}^N w_m f(x_m y_m)}{\sum_{m=1}^N w_m} \quad (1)$$

$$f^{2,3}(x, y) = f^{1,2}(x, y) + \frac{\sum_{m=1}^N w'_m [f(x_m y_m) - f^{1,2}(x_m y_m)]}{\sum_{m=1}^N w'_m} \quad (2)$$

여기서, 함수의 윗첨자는 각 루프의 순서를 의미하며, m 번째 위치에서 첫번째 루프의 가중함수 w_m 과 두번째 및 세번째 루프의 가중함수 w'_m 은 다음과 같다.

$$w_m = \exp \left[- \left(\frac{d_{mx}^2}{c_x^2} + \frac{d_{my}^2}{c_y^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$w'_m = \exp \left[- \left(\frac{d_{mx}^2}{\gamma c_x^2} + \frac{d_{my}^2}{\gamma c_y^2} \right) \right] \quad (4)$$

여기서 d_m 은 격자 점과 m 번째 참조 위치 사이의 거리

$c_x, c_y = x$ 및 y 방향 각각에서의 가중 함수 제어 계수(영향 반경)

γ = 각 루프에서 가중치 간의 차이를 제어하는 수렴 계수(0-1)

거리 가중 함수는 본질적으로 가우시안(Gaussian)을 따르기 때문에(Koch *et al.*[1983]), 영향 반경은 $\exp(-1)$ 과 같다는 가정 하에 비선형 최소제곱법으로 산출할 수 있다. 따라서, 모니터링 정점 배열을 설계하기 위한 목적 함수는 첫번째 루프와 두번째 루프의 식을 세번째 루프의 식에 대입한 다음의 식과 같다.

$$f(x, y) = \pm \left[\frac{\sum_{m=1}^N w_m f(x_m, y_m) + \sum_{m=1}^N w'_m [2f(x_m, y_m) - f^1(x_m, y_m) - f^2(x_m, y_m)]}{\sum_{m=1}^N w_m} \right] \quad (5)$$

최적점을 영향반경 내에서만 찾을 수 있도록, 식(3)을 내부 제약 함수로 정의하여 모니터링 정점 배열 설계를 수행하였다. 또한, 공간 분포를 도식화 할 수 있는 연속적인 목적함수를 활용하여 모니터링 정점 배열을 설계하기 때문에, 정점이 육지와 구조물로 향하지 않도록 비선형 외부 제약 함수를 도식적으로 구축하였다(Kim et al.[2018c]).

2.3 모니터링 정점 배열 설계

이전 절에서 논의 된 바와 같이 BOA에 의해 목적 함수가 구축 되면, 이를 기반으로 공간 분포를 재구성하기 위한 정점의 배열을 찾아야 한다. 본 연구에서는, 연속적인 목적 함수로 구축된 공간 분포 내에서 최적해(전역해 혹은 지역해)를 찾는 도식 최적화 기법을 도입하였다. 육지나 구조물로 인한 경계의 복잡성을 고려하기 위해 제한된 영역을 구성하여 해를 찾는 제약 최적화 기법을 적용하였으며, 그 중에서도 공학적인 문제해결에 널리 사용되고 있는 변환 방법(Transformation method)을 이용하여 정점 배열 설계를 수행하였다(Kalyanmoy[2012]; Venkataraman[2009]).

변환 방법을 이용한 제약 최적화 문제는 목적 함수에 제약 조건을 반영한 페널티 항을 추가하여, 식(6)과 같이 이 문제가 마치 비 제약 최적화(Unconstrained optimization) 문제인 것처럼 변환하여 해를 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } F(x, y, \lambda, s, \rho) = f(x, y) + P(x, y, \lambda, s, \rho) \\ &\text{Subject to } x^{\text{lower}} \leq x \leq x^{\text{upper}} \\ &\quad y^{\text{lower}} \leq y \leq y^{\text{upper}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 λ = 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)
 s = 변환 계수(Shift parameter)
 ρ = 페널티 승수(Penalty multiplier)

페널티 항은 등가 제약 조건(Equality constraint)과 비등가 제약 조건(Inequality constraint)을 반영하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Conn et al.[1991]; [1997]).

$$P(x, y, \lambda, s, \rho) = \sum_{m=1}^N \lambda_i s_i \log(s_i - c_i(x, y)) + \sum_{i=m+1}^{m'} \lambda_i c_{eq_i}(x, y) + \frac{\rho}{2} \sum_{i=m+1}^{m'} c_{eq_i}(x, y)^2 \quad (7)$$

여기서 c = 비등가 제약 조건(Inequality constraint)

c_{eq} = 등가 제약 조건(Equality constraint)

i = 제약 조건의 수

공학적인 최적화 문제에서 등가 제약 조건은 비등가 제약 조건에 비해 적용성이 떨어져 거의 사용되지 않는다. 하지만, 초기 지점이 가용 영역(Feasible region) 바깥에서 시작되는 경우 솔루션이 등가 제약 조건의 경계를 향하도록 설정해야 하기 때문에 이를 항상 고려하여야 한다. 이렇게 제약 최적화 문제를 비제약 최적화 문제로 변환하면, 패턴 탐색 알고리즘(Pattern Search Algorithm, PSA)을 이용하여 목적 함수의 최적해를 찾을 수 있다(Hooke and Jeeves[1961]). PSA는 목적 함수를 편미분하여 방향을 찾는 방법이 아니라, 여러 개의 주변 점들을 탐색하여 참조점보다 목적 함수의 값이 작은 곳으로 향하도록 하는 최적화 기법이다. 최적해로 수렴하기 위한 조건은 (1) $\Delta F^T \Delta F \leq \epsilon$ 함수의 기울기가 더 이상 변하지 않을 때, (2) $\Delta X^T \Delta X \leq \epsilon$ 참조점이 더 이상 변하지 않을 때, 그리고 (3) 최대 반복 횟수에 도달할 때이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 설계 변수의 설정

본 연구에서는 금강하구역을 대표하는 38개 정점을 설정하고 (Fig. 3(a)), 수치 모델 결과 중 각 정점별로 여름철 담수 방류 후 88시간의 수온과 염분을 추출하였다(2015년 8월 21일-23일, 21일 방류 08:51-10:19 방류). 38개 정점을 추출하는 이유는 BOA가 기본적으로 공간 내삽기법이기 때문에 이로부터 목적함수를 구축하여

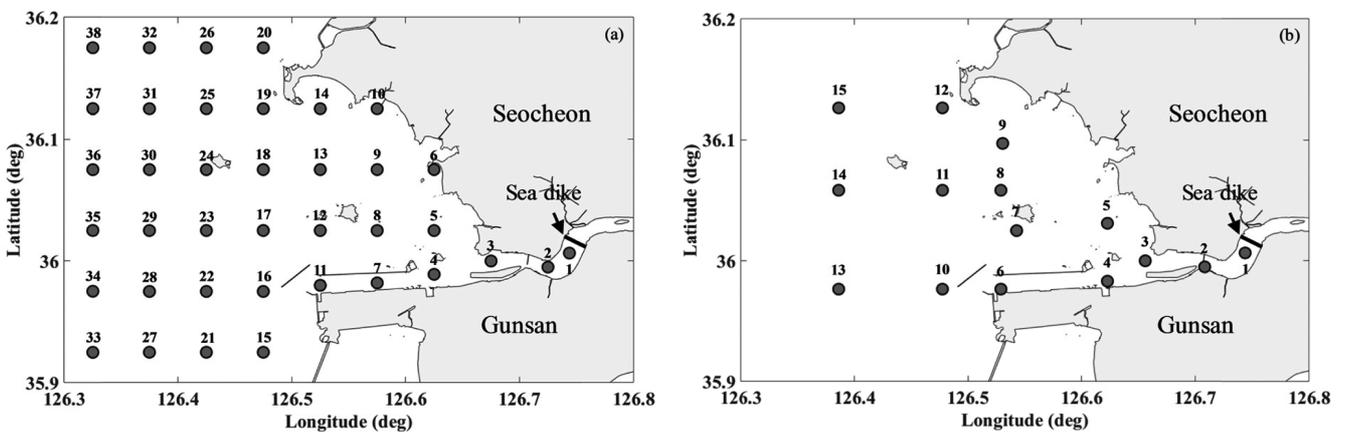


Fig. 3. Arrangement of data extraction from (a) the numerical model and (b) presently operated periodic on-site field observation in GE.

Table 1. Cross-correlation between temperature and salinity for each point

Inside		Interim		Outside			
No.	Correlation	No.	Correlation	No.	Correlation	No.	Correlation
1	0.71	11	-0.80	21	-0.93	31	-0.95
2	0.56	12	-0.72	22	-0.98	32	-0.93
3	-0.10	13	-0.69	23	-0.97	33	-0.96
4	-0.52	14	-0.79	24	-0.91	34	-0.42
5	-0.44	15	-0.69	25	-0.93	35	-0.90
6	-0.22	16	-0.97	26	-0.90	36	-0.95
7	-0.87	17	-0.93	27	-0.85	37	-0.92
8	-0.79	18	-0.78	28	-0.95	38	-0.77
9	-0.91	19	-0.69	29	-0.95		
10	-0.19	20	-0.81	30	-0.96		

PSA를 이용한 최적점을 찾기 위함이다. 실제 연안 정기 현장 관측에서 기본적으로 얻을 수 있는 자료는 수온과 염분이며, 이 두 값의 관계를 충분히 동시에 반영할 수 있는 대표 정점을 찾기 위해 변수 간 상관계수(식 8)를 계산하여 목적 함수의 설계 변수로 설정하였다(Table 1 참조).

$$R_{TS} = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (8)$$

또한, 선정된 최적점 배열로 재구성된 공간 분포의 적정성 여부를 비교 및 평가하기 위해서 현재 금강하구에서 운영되고 있는 15개의 정기 현장 모니터링 정점을 설정(Fig. 3(b))하고 앞선 38개 정점과 같이 수치모델로부터 데이터를 추출하여 공간 분포를 재구성하였다. 이러한 15개의 정기 현장 관측점은 어떠한 공학적인 기준 전

략을 기반으로 구성된 것이 아니라 연구자의 경험과 판단으로 결정되었기 때문에, 최적점의 타당성 여부를 평가할 수 있는 비교 대상으로 적절하다고 판단된다.

이를 바탕으로 BOA를 통해 목적 함수를 구축하여 공간 분포를 재구성하면 Fig. 4와 같다. 수온과 염분은 하구둑에서 매우 가까운 지역인 1,2번 정점에서는 양의 상관도를 가지며, 내해측인 3번-10번까지는 대체로 음의 상관도를 가지지만 특별한 경향성을 보이지 않는다(Table 1 참조). 중간 해역인 11번-20번과 외해역으로 분류되는 21번-38번은 대부분 높은 음의 상관도를 보이고 있다. 대체로, 수온과 염분이 양의 상관도를 보이는 것은 담수 방류의 영향으로 수온과 염분이 함께 감소하였다 증가하는 국부적인 특성인 것으로 보여지며(Fig. 5(a)), 음의 상관도를 보이는 것은 담수의 영향을 크게 받지 않고 조석의 영향에 의한 변동성을 가지는 전역적인 금강하구의 특성으로 보여진다(Fig. 5(b)).

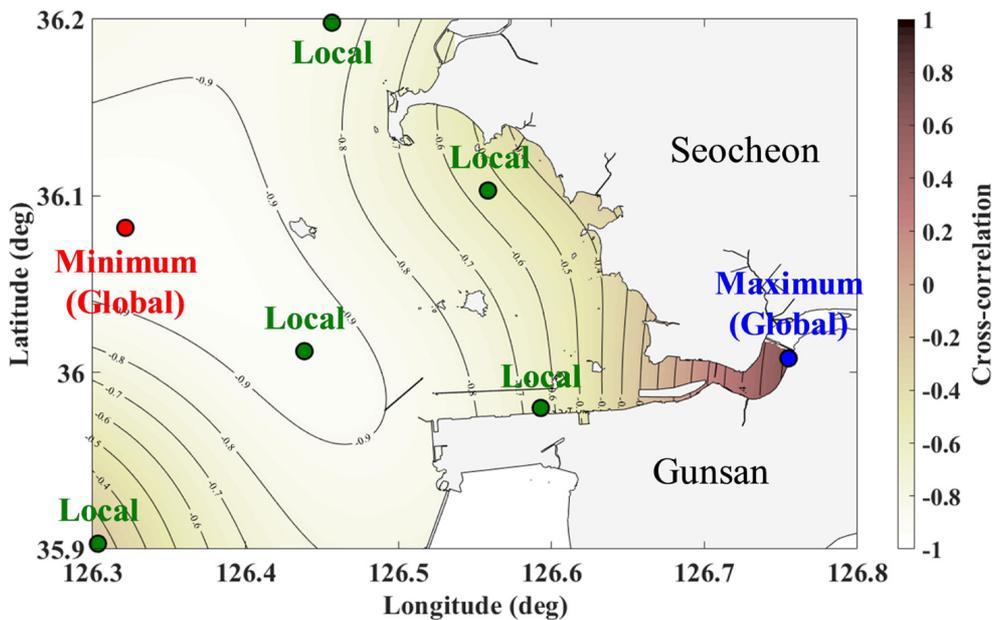


Fig. 4. The spatial distribution of the original objective function for cross-correlation between water temperature and salinity (Blue and red dot: global solution; green dot: local solution).

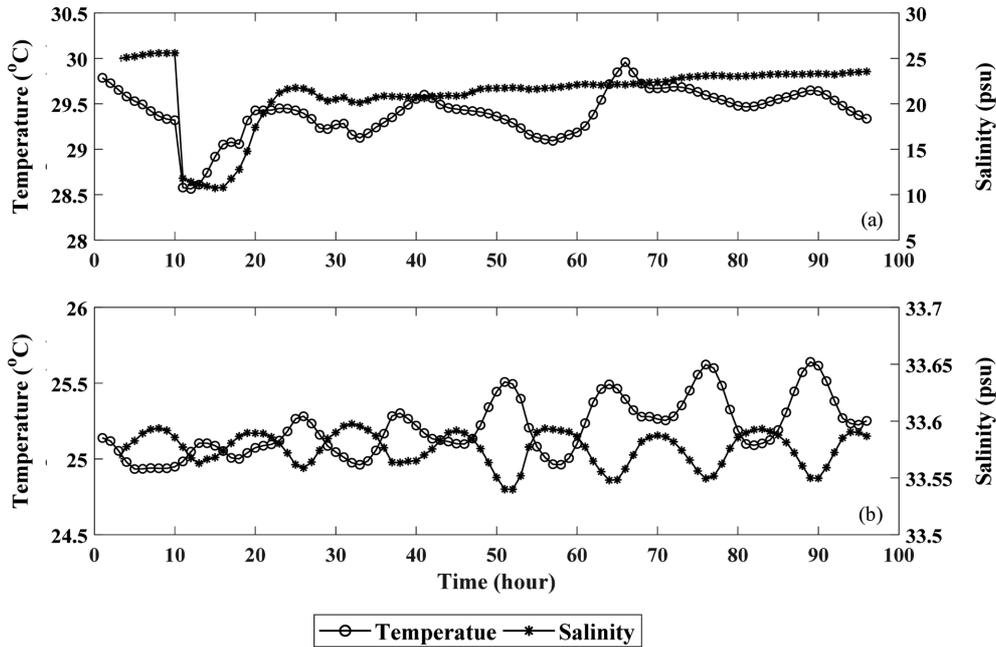


Fig. 5. Time series of temperature and salinity on the (a) inside (pt.1) and (b) outside (pt.38) of the coastal region.

3.2 최적점의 배열 선택

수위의 변화를 파악하기 위한 모니터링 정점은 연구자의 경험에 따라 균일한 배열을 설정하여 수행 해 왔다(Kim et al.[2018c]). 또한, 한번 설정된 정점의 위치는 데이터의 통일성을 위해 변경하지 않고, 단지 모니터링 시간의 용이성을 위해 몇몇 정점을 제외하고 모니터링을 수행 해 왔다. 이는 모니터링 정점의 개수와 위치를 선택하기 위한 체계적인 절차의 부재 때문이다. 본 연구의 궁극적인 목표는 공간 분포의 변동성을 효과적으로 나타내기 위한 체계적인 연구 절차를 제안하는 것이며, 더불어 실제 현장에서 시-공간적인 한계로 인해 많은 수의 정점을 관측하지 못함에 따른 문제를 해결하기 위한 적정 정점의 개수와 위치를 제안하고자 함이다.

PSA를 이용한 최적점은 양의 목적함수를 이용하였을 경우 전역 최소점(Global minimum)을 찾을 수 있으며 이는 외해역에 위치하게 된다. 음의 목적함수를 이용하였을 경우 전역 최대점(Global maximum)을 찾을 수 있으며 이는 하구둑 앞에 위치하게 된다. 그 밖의 지역해(Local)에 해당하는 점들은 내부 제약 함수에 해당하는 BOA의 가중 함수와 외부 제약 함수에 해당하는 비선형 도식 함수를 반영하여 5개의 점이 선택되었다(Fig. 4). 따라서, 수온과 염분의 상관도로부터 두 변수를 동시에 반영할 수 있는 대표 정점은 총 7개이며 공간적으로 불규칙하게 배열되었다.

Fig. 6(a)는 앞선 38개 정점에서 추출한 수온을 BOA의 목적 함수로 구성한 참값의 공간 분포이며 Fig. 6(b)는 현재 금강하구에서 운영되고 있는 15개의 정기 현장 모니터링 정점으로 구성된 수온의 공간 분포이다. Fig. 6(c)는 수온과 염분의 상관도를 이용하여 선택한 7개의 대표 정점으로 구성된 수온의 공간 분포이다. 현재 운영되고 있는 15개의 정점 배열은 최적점의 배열로 재구성한 공간

분포보다 등고선의 형태가 유사함을 보이고 있다. 이러한 등고선의 형태는 최적 정점의 개수가 현재 운영되고 있는 정점의 개수보다 반 이상 적은 개수로 공간 분포를 재구성하였기 때문에, 상대적으로 적은 정점에 대한 참조값이 충분하지 않아 지역적으로 ±0.5 °C 수준의 일그러진 보간 형태를 갖는 것으로 보여진다. 반면 현재 운영되고 있는 정점의 경우 외해쪽으로 충분한 참조값이 없음으로 인해 +0.5 °C 수준으로 과대 산정되었다. 염분의 경우 15개의 정점 배열이 최적점의 배열보다 더 유사한 형태의 등고선을 유지하고 있음을 보인다(Fig. 7). 최적점의 배열로부터 얻어진 등염분선의 형태는 수온보다 비교적 안정적인 형태를 띄고 있으나 지역적으로, 특히 외해역을 따라 ±0.4 psu 수준의 일그러진 보간 형태를 띄고 있다. 하지만, 본 연구에서의 최적점 배열은 전역 혹은 지역해의 최소 및 최대점을 연속적인 함수로 연결하여 공간분포를 재구성하였기 때문에, 현재 금강하구에서 운영되고 있는 정점의 배열보다 적은 개수로도 비교적 참값과 유사한 공간분포를 얻을 수 있다. 이는 최적점의 배열이 임의로 선택된 배열보다 더 합리적인 근거를 제공할 수 있기 때문에, 공학적인 평가 지표로서 활용가치가 높다고 판단된다(Hernandez[1995]; Hackert et al.[1998]; Rogowski et al.[2012]).

좀 더 정량적인 타당성 평가를 위해, 참값의 공간분포와 재구성된 공간분포의 통계적 변수를 계산하였다(Table 2 참조). 수온과 염분의 상관도로부터 얻어진 최적점 배열을 이용하여 다시 수온과 염분의 공간분포를 각각 재구성 하면, 현재 운영되고 있는 현장 모니터링 정점과 최적점이 약 0.97-0.98의 매우 높은 상관도를 보인다. 이는, 재구성한 공간분포의 데이터 개수가 많음에도 불구하고 값 자체의 차이가 참값과 비교하여 크지 않기 때문이다. 하지만 재구성한 분포의 공간 변동성이 참값과 비교하여 크기 때문에(Fig. 6c,

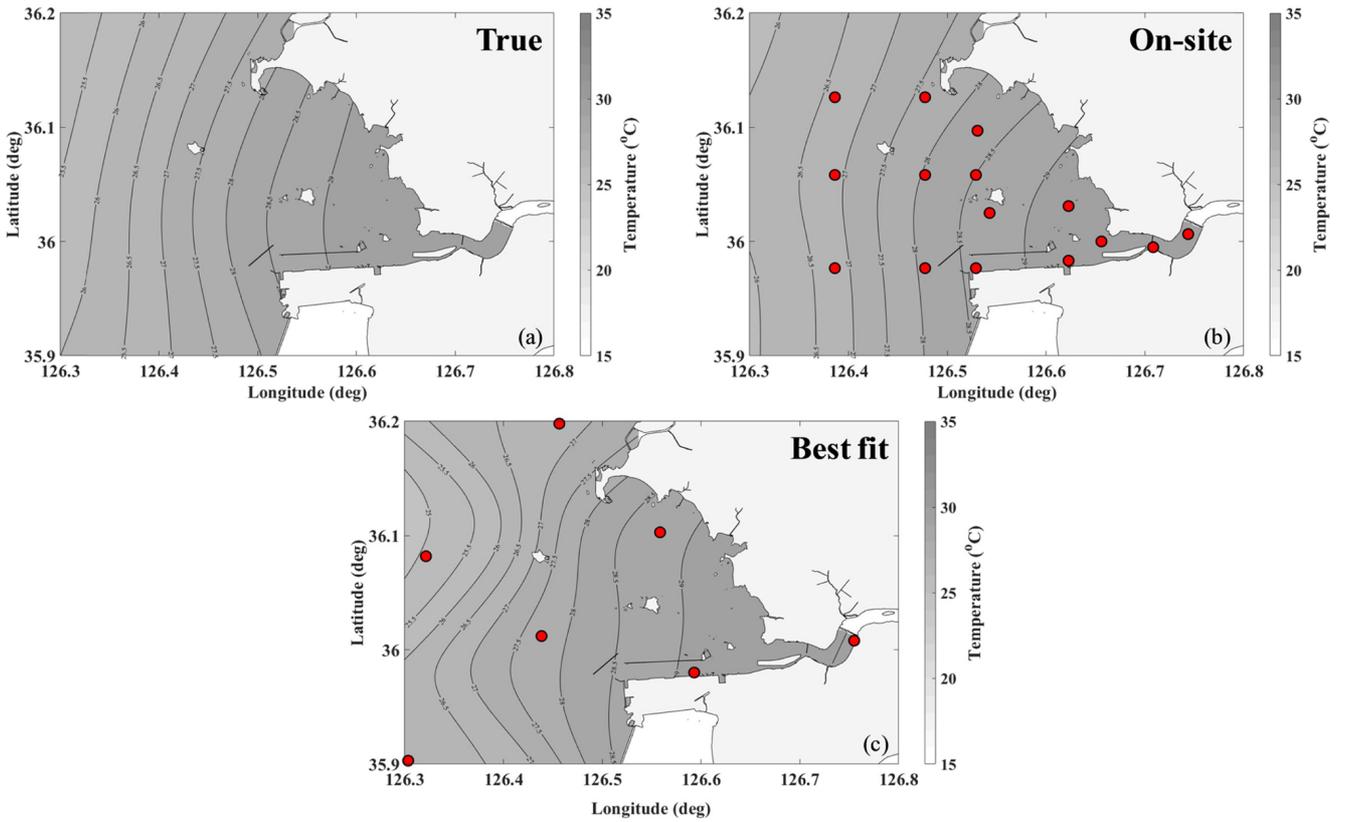


Fig. 6. The spatial distribution of the temperature for the (a) true, (b) on-site, and (c) best-fitted array.

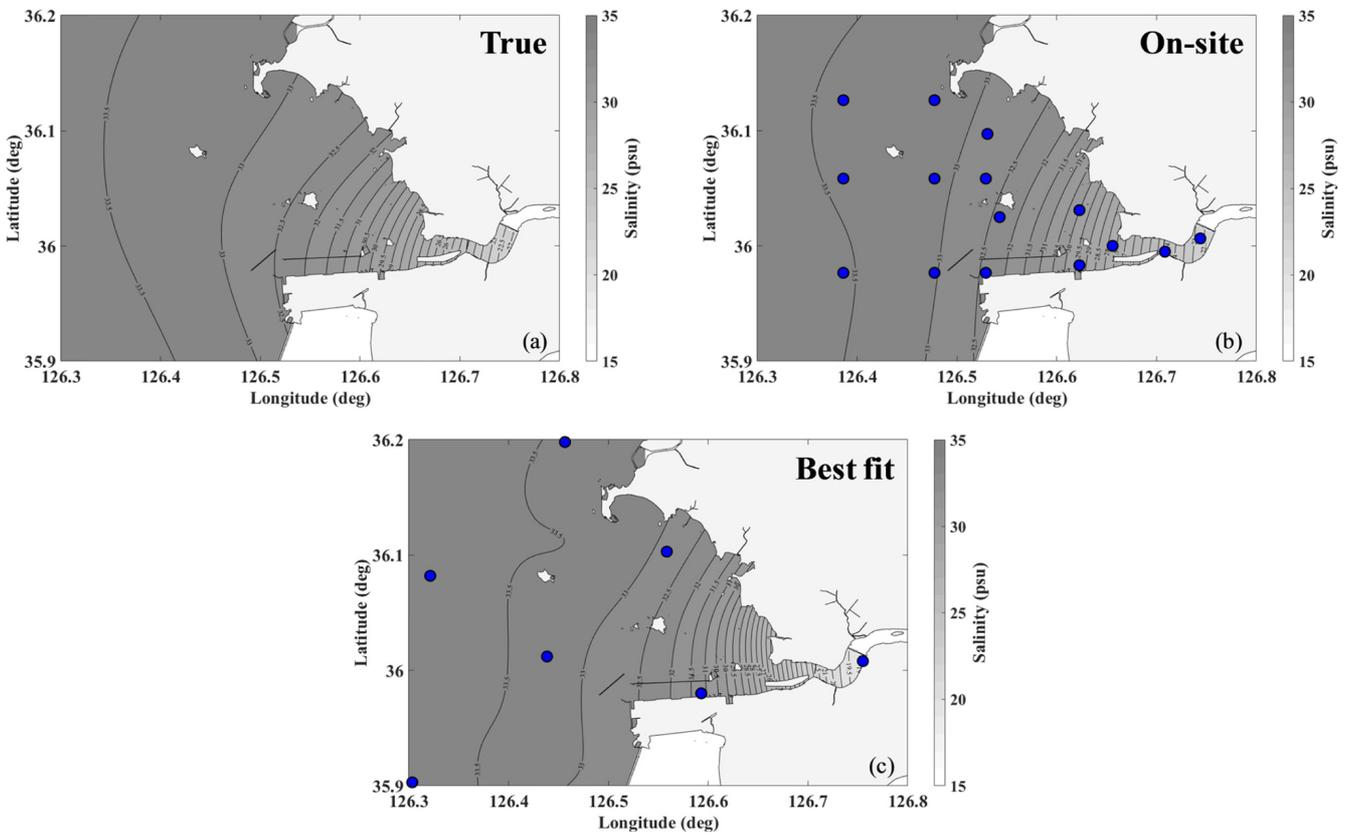


Fig. 7. The spatial distribution of the salinity for the (a) true, (b) on-site, and (c) best-fitted array.

Table 2. Statistics on estimates of water temperature and salinity

Variable	Statistics	Present array	Fitted array
Temperature	Correlation	0.98	0.98
	RMSE	0.39	0.28
	Bias	-0.14	0.06
Salinity	Correlation	0.98	0.97
	RMSE	0.51	1.04
	Bias	0.09	0.24

7c), 평균제곱근오차(RMSE)와 편향도(Bias)를 계산하여 분포의 공간 변동성 정도를 확인하였다. 수온의 경우, 최적점의 배열이 정기 현장 관측점의 배열보다 더 낮은 오차와 편향도를 나타내고 있어, 최적점의 배열이 수온의 공간 변동성을 더 잘 표현하고 있다고 볼 수 있다. 염분은 정기 현장 관측점의 배열이 최적점의 배열보다 더 낮은 오차와 편향도를 나타내고 있어, 최적점의 배열이 염분의 공간 변동성을 더 잘 표현한다고 보기는 어렵다. 하지만, 최적점의 배열은 개수는 적지만 정기 현장 관측점과 비슷한 수준으로 공간 분포를 재구성할 수 있어 관측에 소요되는 선박 수와 시간을 절약할 수 있다는 장점이 있다. 이는 실제 현장에서 모니터링이 용이한 시간과 공간에 한계가 있기 때문에, 적은 개수로도 비슷한 성능을 유지할 수 있다면 모니터링 정점의 개수를 줄이는 것이 효과적이라고 볼 수 있다. 모니터링 정점이 많을수록 관측에 드는 시간이 오래 걸릴 것이고, 이는 결국 모든 정점들의 정상성을 유지한다라는 가정이 깨질 뿐만 아니라 짧은 시간 동안 담수 방류에 의해 발생할 수 있는 특징적인 변화들을 놓칠 가능성도 있다. 따라서, 본 연구에서 제안한 체계적인 틀 안에서 설계를 할 경우 선택된 수온과 염분의 최적점의 배열(Fig. 6c, 7c)을 사용하여 공간 분포를 재구성하고 각 변수의 통계 특성을 평가(Table 2 참조)한 합리적인 근거를 제공할 수 있다. 결론적으로, 현재 운영되고 있는 모니터링 관측점 배열의 전체적인 공간 변동성을 충분히 반영한 TS 공간 분포를 상대적으로 적은 개수로도 재구성할 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 절차를 보다 다양한 시나리오에 적용하려면, 몇가지 사항들이 추가적으로 고려되어야 한다. 첫째, 보다 장시간의 수치모델 자료를 활용하여야 한다. 일반적인 정기 현장 관측은 계절별로 수행이 되어 오는 경우가 많기 때문에(Kim *et al.*[2018b]; Lee *et al.*[1999]; Shin[2013]), 이를 고려한 설계가 이루어져야 한다. 둘째, 실제 현장의 한 정점에서 취득할 수 있는 데이터는 수온과 염분만이 아니라 용존산소, 클로로필, 총질소, 총인 등 여러가지 종류가 있다(Jeong *et al.*[2005]; Kim and Kang [2002]). 물론 이 모든 변수들을 고려할 수 있는 시스템을 구축하면 좋겠지만, 실제 각 변수들 간의 복잡한 비선형 시계열 상관성을 모두 고려하여 설계하는 것은 불가능에 가깝다. 그렇다면 최대한 한 정점에서 취득할 수 있는 데이터의 대표적인 특성을 반영할 수 있는 변수들을 선택하여, 이를 기반으로 인덱스를 산정하고 관측망을 설계한다면 보다 공학적인 기반이 갖추어진 설계가 이루어질 수 있을 것이다. 셋째, 기존의 선행 연구자들이 수행해 왔던 공분산 및 평균제곱근오차 등과 같은 정량적인 목적함수를 이용한 설계도 수행하여야 한다(Barth

and Wunsch[1990]; Baehr *et al.* [2008]; Hernandez *et al.* [1995]; Rogowski *et al.*[2012]). 이는 본 연구에서 제안하는 도식적인 모니터링 정점 설계 결과를 뒷받침 해줄 수 있는 비교 검증 자료로 활용할 수 있어 본 연구의 독창성을 뒷받침할 수 있을 것이다.

4. 결 론

많은 선행 연구자들은 해역의 프로세스를 이해하고 관리하기 위한 최적 모니터링 시스템이 수립되어야 한다는 것을 인식 해왔다. 모니터링 정점의 배열을 체계적인 절차에 따라 설계할 경우 보다 공학적인 결과를 제공할 수 있고, 해역을 운영 및 관리하는 데 드는 비용, 시간 및 노력을 줄임과 동시에 데이터의 신뢰성을 높일 수 있다. 더욱이 이는 자료 동화에 의한 예보 모델의 정확도를 향상시키는 추가적인 이점을 제공할 수 있다(Harkert *et al.*[1998]; Pham *et al.*[2016]). 해양학뿐만 아니라 기상학 분야에서도 몇 가지 방법론적 접근법이 수행되었지만, 정점의 배열 설계는 여전히 연구자의 경험에 따른 직관적이고 임의적인 방법으로 결정되고 있다(Baehr *et al.*[2008]; Barth and Wunsch[1990]; Hernandez *et al.*[1995]). 이는 최적 정점의 배열을 결정하기 위한 공학적인 체계와 법적인 절차의 부재 때문일 수 있다. 이러한 이유로, 방법론적 관점에서 다양한 해역에 적용할 수 있는 체계적인 설계 절차가 개발되어야 한다.

본 연구에서 제안한 설계 절차는 충분한 시·공간적 정보를 보장하기 위해서는 수치 모델의 결과 사용이 필연적임을 시사한다. 불규칙적인 담수 방류로 인한 수온과 염분의 복잡성은 시계열의 상관관계를 인덱스화 하여 설계 변수로 활용함으로써 보다 간단하게 해석될 수 있다. 이 방법은 단일 변수 최적화 문제와 같지만 선행 연구와 같이 유속 혹은 염분 등 하나의 독립 변수를 고려한 것과는 다른 접근 방식으로, 다변수를 인덱스화 하여 단일 변수처럼 설계 변수로 활용할 수 있음을 시사한다(Barth[1992]; Baehr *et al.*[2008]; Hernandez *et al.*[1995]; Rogowski *et al.*[2012]). 더불어, 선행 연구들은 공분산 혹은 평균제곱근오차 등과 같은 정량적인 목적함수를 구축하여 대규모 해양에서의 모니터링 설계를 수행하였다. 이는 금강하구와 같이 복잡한 육지 및 구조물의 경계가 있고, 불규칙적인 담수 방류로 인한 공간 변동성이 큰 소규모 해역에 적용하기는 어렵다. 따라서, 객관 분석과 같은 연속적인 공간 분포를 생성할 수 있는 보간 기법의 주 함수를 목적 함수로 구축하고, 여러가지 복잡한 경계를 반영할 수 있는 제약 함수와 함께 최적화 하여 모니터링 정점 배열을 설계할 수 있다.

최적점의 배열은 현재 금강하구에서 운영되고 있는 직관적인 모니터링 정점 배열과 유사한 결과를 보였지만, 더 나은 결과를 산출해냈다고 볼 수는 없다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 제안하는 설계 절차에 따라 모니터링 정점 배열을 설계해야 하는 이유는, 최적점의 배열이 현재 운영되고 있는 정점보다 반 이상 적은 개수로도 충분히 유사한 공간 분포를 재구성할 수 있기 때문이다. 또한, 연구자의 경험에 의존한 직관적인 설계보다 공학적으로 유의미한

근거를 제시하였기 때문에 보다 체계적으로 관측망을 구성하였다고 볼 수 있다. 따라서, 관측점의 위치가 합리적이고 정점의 개수가 최소한으로 선택되었음에 따라, 여러가지 측면에서 보다 경제적인 관측망을 구축할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(하구역 종합관리시스템 개발 연구).

References

- [1] Alcock, F., 2007, An Assessment of Florida Red Tide: Causes, Consequences and Management Strategies, Technical Report #1190, Monte Marine Laboratory, Sarasota, FL, 40p.
- [2] Baehr, J., McInerney, D., Keller, K. and Marotzke, J., 2008, Optimization of an Observing System Design for the North Atlantic Meridional Overturning Circulation, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 25, 625-634.
- [3] Barth, A., Azcarate, A.A., Joassin, P., Beckers, J.-M. and Troupin, C., 2008, Introduction to Optimal Interpolation and Variational Analysis, In: Paper Presented at the SESAME Summer School, Varna, Bulgaria.
- [4] Barth, N. and Wunsch, C., 1990, Oceanographic Experiment Design by Simulated Annealing, *J. Phys. Oceanogr.*, 20, 1249-1263.
- [5] Barth, N., 1992, Oceanographic Experiment Design II: Genetic Algorithms, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 9, 434-443.
- [6] Barnes, S.L., 1964, A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis, *J. Appl. Meteorol.*, 3, 396-634.
- [7] Barth, A., Azcarate, A.A., Joassin, P., Beckers, J.M. and Troupin, C., 2008, Introduction to Optimal Interpolation and Variational Analysis, In: Paper Presented at the SESAME Summer School, Varna, Bulgaria.
- [8] Bretherton, F.P., Davis, R.E. and Fandry, C.B., 1976, A Technique of Objective Analysis and Design of Oceanographic Experiments Applied to MODE-73, *Deep-Sea Res.*, 23, 559-582.
- [9] Cho, J., Song, Y. and Kim, T.I., 2016, Numerical Modeling of Estuarine Circulation in the Geum River Estuary, Korea, *Procedia Eng.*, 154, 982-989.
- [10] Conn, A.R., Gould, N. and Toint, Ph.L., 1991, A Globally Convergent Augmented Lagrangian Algorithm for Optimization with General Constraints and Simple Bounds, *SIAM J. Numer. Anal.*, 28(2), 545-572.
- [11] Conn, A.R., Gould, N. and Toint Ph.L., 1997, A Globally Convergent Lagrangian Barrier Algorithm for Optimization with General Inequality Constraints and Simple Bounds, *Math. Comput.*, 66(217), 261-288.
- [12] Gandin, L.S., 1965, Objective Analysis of Meteorological Fields, Israel Program for Scientific Translations.
- [13] Hackert, E.C., Miller, R.N. and Busalacchi, A.J., 1998, An Optimized Design for a Moored Instrument Array in the Tropical Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 103, 7491-7509.
- [14] Hernandez F., LeTraon, P.Y. and Barth, N., 1995, Optimizing a Drifter Cast Strategy with a Genetic Algorithm, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 12, 330-345.
- [15] Hooke, R. and Jeeves, T.A., 1961, "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problem, *J. ACM*, 8(2), 212-229.
- [16] Hwang, J.H., Pham, V.S., Choi, B.J., Chang, Y.S. and Kim, Y.H., 2014, The physical processes in the Yellow Sea, *Ocean Coastal Manage.*, 102, 449-457.
- [17] Hwang, J.H., Jang, D. and Kim, Y.H., 2017, Stratification and Salt-wedge in the Seomjin River Estuary under the Idealized Tidal Influence, *Ocean Sci. J.*, 52(4), 469-487.
- [18] Jang D., Hwang, J.H., Park, Y.G. and Park, S.H., 2012, A study on salt wedge and river plume in the Seom-Jin river and estuary, *KSCE J. Civ. Eng.*, 16(4), 676-688.
- [19] Jang, D. and Hwang, J.H., 2013, Estuary classification method for considering climate change effects in South Korea, *J. Coast. Res.*, SI65, 962-967.
- [20] Jeong, Y.H., Kim, Y.T., Chae, Y.Z., Rhee, C.W., Ko, K.R., Kim, S.Y., Jeong, J.Y. and Yang, J.S., 2005, Analysis of Long-Term Monitoring Data from the Geum River Estuary, *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 10(3), 139-144. (in Korean)
- [21] Kalyanmoy, D., 2012, Optimization for Engineering Design: Algorithms and Example, second ed., PHI Learning Private Limited, New Delhi.
- [22] Kim, J.G. and Kang, H., 2002, The Effect of Tidal Cycle and River Runoff on the Dynamic of Nutrients in Keum River, *J. Environ. Sci. Int.*, 11(6), 519-528 (in Korean).
- [23] Kim, N.H., Hwang, J.H. and Ku, H., 2016, Stratification of tidal influenced navigation channel, *J. Coastal Res.*, SI75, 63-67.
- [24] Kim, N.H., Hwang, J.H. and Kim, D.H., 2018a, Evaluation of Mixing and Stratification in an Estuary of Korea, *J. Coastal Res.*, SI85, 96-100.
- [25] Kim, N.H., Pham, V.S., Hwang, J.H., Won, N.I., Ha, H.K., Im, J. and Kim, Y., 2018b, Effects of Seasonal Variations on Sediment-Plume Streaks from Dredging Operations, *Mar. Pollut. Bull.*, 129, 26-34.
- [26] Kim, N.H., Hwang, J.H., Cho, J. and Kim, J.S., 2018c, A Framework to Determine the Locations of the Environmental Monitoring in an Estuary of the Yellow Sea, *Environ. Pollut.*, 241, 576-585.
- [27] Koch, E., DesJardins, M. and Kocin, P., 1983, An Interactive Barnes objective Map Analysis Scheme for Use with Satellite and Conventional Data, *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1487-1503.
- [28] Lee, S.H., Kwon, H.K., Choi, H.Y., Yang, J.S. and Choi, J.Y., 1999, Physical Environment Changes in the Keum River Estuary

- ary by Dyke Gate Operation II. Salinity Structure and Estuary Type, *The Sea, J. Korean Soc. Oceanogr.*, 4(4), 255-265. (in Korean)
- [29] LeTraon, P.Y. and Hernandez, F., 1992, Mapping the Oceanic Mesoscale Circulation: Validation of Satellite Altimetry using surface drifters, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 9, 698-698.
- [30] Pham, V.S., Hwang, J.H. and Ku, H., 2016, Optimizing Dynamic Downscaling in One-Way Nesting using a Regional Ocean Modeling, *Ocean Model.*, 106, 104-120.
- [31] Pierce, R.H. and Henry, M.S., 2008, Harmful Algal Toxins of the Florida Red Tide (*Karenia brevis*): Natural Chemical Stressors in South Florida Coastal Ecosystem, *Ecotoxicology*, 17, 623-631.
- [32] Rogowski, P., Stolkin, R. and Bruno, M., 2012, Optimization of the Spatial Distribution of Oceanographic Sensors in a Highly Variable Estuarine Environment, *J. Mar. Environ. Eng.*, 9, 211-224.
- [33] Shin, Y.K., 2013, An Ecology Study of Phytoplankton Community in the Geum River Estuary, *Korean J. Ecol. Environ.*, 46(4), 524-540. (in Korean)
- [34] Spencer, P.L., Janish, P.R. and Doswell, C.A., 1999, A Four-Dimensional Objective Analysis Scheme and Multi Triangle Technique for Wind Profiler Data, *Mon. Weather Rev.*, 127, 279-291.
- [35] Venkataraman, P., 2009, *Applied Optimization with MATLAB Programming*, second ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Received 1 October 2018

Revised 28 October 2018

Accepted 8 November 2018