

Original Article

부산 연안 해수의 투명도와 부유물질의 공간 분포 특성에 관한 연구

이상협¹ · 장성철² · 윤한삼^{3,*}

¹부경대학교 해양산업공학 협동과정 대학원생

²부경대학교 해양산업개발연구소 연구원

³부경대학교 교양교육원 교수

Spatial Distribution Characteristics of Transparency and Suspended Solids in Busan Coastal Waters

Sang-Hyub Lee¹, Sung-Chul Jang², and Han-Sam Yoon^{3,*}

¹Graduate Student, Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering,
Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Postdoctoral Research Scientist, Research Center for Ocean Industrial and Development,
Pukyong National University, Busan 48513, Korea

³Professor, College of Liberal Arts, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

본 연구에서는 최근 10년 동안(2011~2020년)의 해수에 대한 투명도와 부유물질 관측치를 이용하여 부산 연안 해역환경 특성을 평가하였다. 부산 연안에서 투명도의 평균값은 약 3.2 m, 부유물질의 표층 및 저층의 평균값은 각각 8.18 mg/L, 10.71 mg/L이다. 투명도가 가장 낮은 해역은 낙동강 하구둑 남측 및 다대포 서측 전면 해역이었다. 또한 부유물질 농도의 경우 표층은 낙동강 하구둑이 78.6 mg/L, 저층은 부산 신항 내측이 92.6 mg/L로 가장 높았으며 가장 낮은 해역은 부산 남항, 수영강 하류 및 기장군 고리원전이었다. 그리고 투명도와 부유물질을 기반으로 군집분석을 수행한 결과로부터 부산 연안은 7개의 군집으로 구분하여 나타낼 수 있었다.

Abstract – This study evaluated the environmental characteristics of the Busan coastal seawaters by using the transparency and suspended solid observations of the last 10 years of seawaters. As a result of the analysis of the observation data, the mean value of transparency in the coast of Busan was about 3.2 m, and the mean value of the surface and bottom layer of suspended matter corresponded to 8.18 mg/L and 10.71 mg/L, respectively. The sea area with the lowest transparency corresponds to the southern sea area on the estuary of the Nakdong River and the western side sea of Dadeapo. Also, the survey point showing the maximum suspended solids concentration was 78.6 mg/L at the estuary of the Nakdong River at the sea level, and 92.6 mg/L at the bottom of the Busan New Port inner sea area. On the other hand, the survey points with the lowest concentration of suspended solids corresponded to the southern port of Busan Port, the Suyeong River estuary, and the waters in front of the Gijang Kori Nuclear Power Plant. And from the results of cluster analysis based on transparency and suspended solids, the Busan coast can be classified into 7 clusters.

Keywords: Busan coast(부산 연안), Suspended solids(부유물질), Transparency(투명도), Cluster analysis(군집 분석), Spatial distribution(공간분포)

1. 서 론

연안 환경에서 부유물질에 의한 탁도의 증가는 광 투과량을 감소시켜 1차 생산량에 영향을 미치며 부유물질의 침착에 의해 부착

기질이 감소되고 서식처가 파괴됨으로써 저서 생물들의 생태-생리적 영향을 증가시키는 요인이 될 수 있으며, 장기적으로는 대량 폐사를 일으켜 어업 피해를 초래할 수 있다(Ohata *et al.*[2011]).

부유물질이 연안 환경과 생태계에 미치는 영향은 간과될 수 없으며 적절한 관리가 없으면 부유물질에 의한 영향은 심화될 가능성이 높다. 부유물질에 의해 해양생물에 미치는 영향의 정도를

*Corresponding author: yoonhans@pknu.ac.kr

결정하는 것은 매우 어렵지만, 탁도와 부유물질량과의 관계, 탁도 측정의 지질·수리학적 조건, 탁도 측정 기기의 신뢰도 등이 중요하게 다루어져야 할 요소이다(Bash *et al.*[2001]). 그래서 해양에서 투명도는 가장 손쉽게 수질을 평가할 수 있는 수단으로 이용되었고, 연안해역이나 해양의 부유물질 분포를 평가하는데 활용되어 왔다(Choi and Kwon[1998]).

일반적으로 수계에 존재하는 부유물질과 오타크 정도를 측정하는 방법에는 부유물질량(SS, mg/L), 탁도(Turbidity, NTU) 및 투명도(Transparency), 수심이 서로 연관되어 사용되고 있으나 각각의 지표간에 상호 관련성에 대한 규명은 아직 명확하지 않다. Cho and Kim[2003]은 해역의 SS 농도를 측정하기 위하여 탁도계 센서를 사용하는 경우에는 수층의 퇴적물 입도분포를 고려하여 수층별로 다른 검교정 선형회귀식을 사용하여야 보다 정확한 값을 얻을 수 있다고 주장하였다.

Jang *et al.*[2015]은 우리나라 서해권의 탁도는 대부분 10 NTU 이상이며 최대 37 NTU로 매우 높은 탁도를 보였고, 남해권은 대부분 10 NTU 미만, 동해권은 3 NTU 이하로서 서해권이나 남해권에 비해 탁도가 낮은 것으로 조사되었다. 또한 Lee *et al.*[2003]은 항

만공사시 발생하는 부유토사는 표층에서 취송류, 저층에서 조류의 영향을 많이 받으며, 부유토사의 확산은 표층보다는 저층으로 더 멀리 확산된다고 주장하였다.

본 연구 대상해역인 부산 연안은 부산항 및 부산신항과 같은 대규모 항만, 낙동강 대하천, 대한해협과 인접한 열린 바다의 지정학적 위치로 인해 타 해역보다 다소 복잡하고 역동적인 해양환경 특성을 가질 수 있다. 이처럼 연안에서는 항만 및 연안개발사업, 산업폐수의 유입, 토사투기 등의 육상 기원 토사가 유입되어 부유물질을 더욱 고농도화 시킨다. 또한 연안 관리를 위하여 지속적으로 이루어지는 준설이나 연안으로의 선박운항이 증가하고 장기간 연안에서 정박하게 됨으로써 퇴적층으로부터 부유물질이 부유하게 되면서 연안 환경에 큰 변화를 초래하게 된다(Lee[2015]).

따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 해양환경정보포털에서 제공되는 최근 10년 동안의 부산 연안 해수에 대한 투명도와 부유물질 관측 자료를 이용하여 두 지표간 상호 관련성을 검토하고 부산 연안의 해양환경 특성을 살펴보고자 하였다. 특히 표층에서 관측된 투명도의 변화와 동일 지점의 표층과 저층에서 관측된 부유물질과의 상호 관련성에 대해서 장기 데이터를 바탕으로 분석하였다.

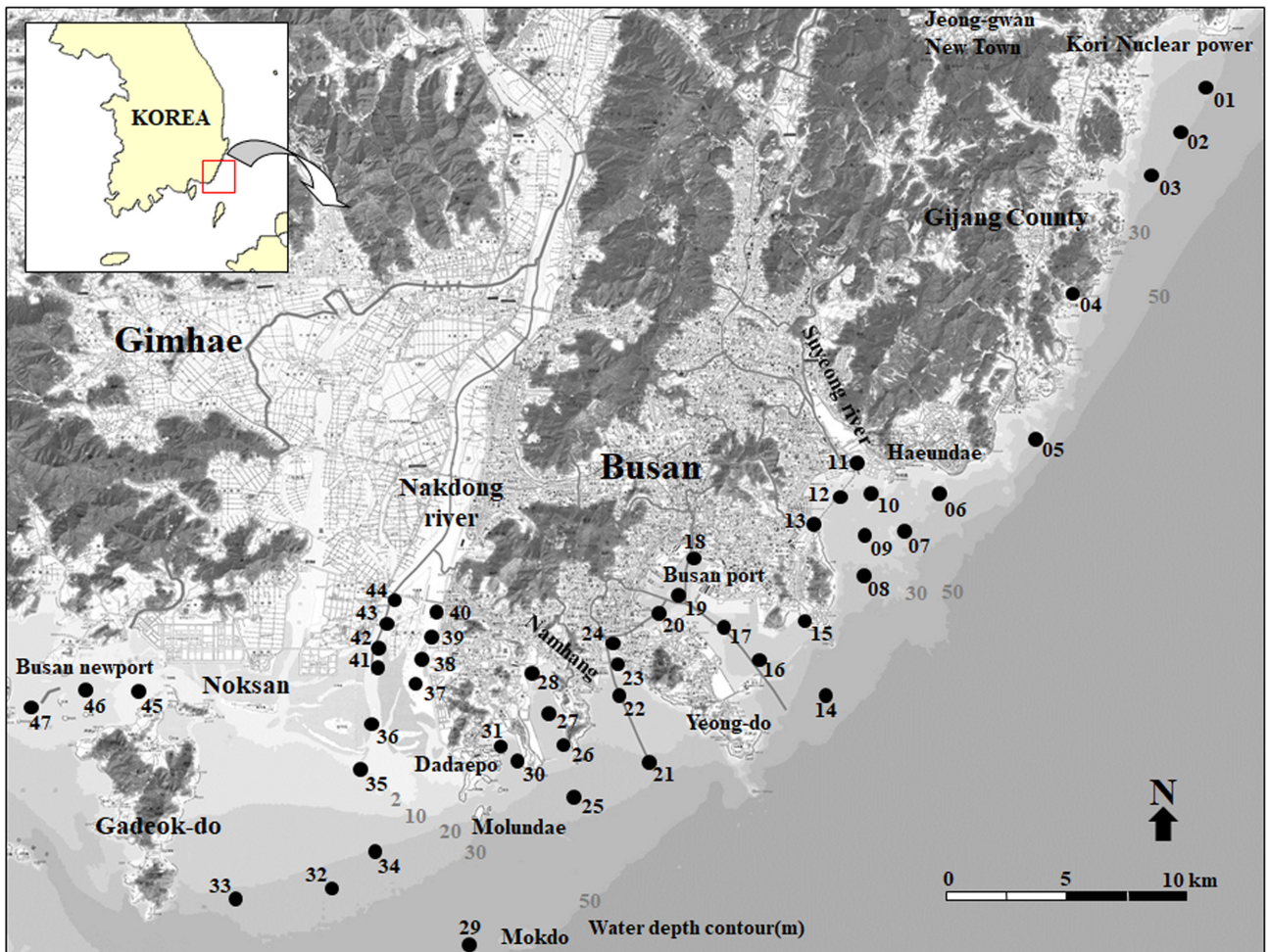


Fig. 1. Sampling stations of transparency and suspended solid data in the Busan coastal region.

2. 재료 및 방법

2.1 투명도와 부유물질 자료 수집

본 연구에서는 해양수산부 해양환경정보포털(<https://www.meis.go.kr/portal>)에서 제공하는 부산 연안 47개 정점에서 관측된 해양환경측정망 데이터를 수집하였다(Fig. 1). 수집된 데이터는 표층 부유물질(SurFace Suspended Solids, SFSS) 및 저층 부유물질(SeaBed Suspended Solids, SBSS), 수심(Depth), 투명도(Transparency)이다. Fig. 1은 수집된 자료의 47개 정점을 나타내고 있으며 연도별 조사 정점의 차이는 있으나, 10년 동안(2011~2020년) 매 분기별(2, 5, 8, 11월) 자료를 살펴보았다.

2.2 투명도와 부유물질의 상관 회귀식

부유물질(Suspended solids)은 일반적으로 수계에 존재하는 입자 지름 2 mm 이하로 물에 용해되지 않는 물질을 의미하며 이와 관련된 용어로 SS(suspended solids, suspended sediments), 부니, 부유토사, 현탁물질 등으로 통용된다. 또한 투명도(Transparency)는 해수의 투명한 정도를 나타내는 지표로서 주로 해수 중에 있는 부유 현탁물질의 양에 따라 달라진다. 부유물질은 해저나 육지로부터 기인한 것이기 때문에 투명도의 변화는 해수의 연직 혼합 및 유동 상태 등 해황을 판단하는데 유용한 지표가 된다(Choi and Kwon [1998]). 해양 상층수의 투명도는 투명도관(Secchi disc)의 깊이에 의해 정량적으로 결정될 수 있으며, 일정 해역에서 투명도관의 깊이가 얕은 곳은 엽록소의 양이 많다(Pickard and Emery[1990]). 이처럼 해양에서 투명도는 가장 손쉽게 수질을 평가할 수 있는 수단으로 이용되었고, 연안해역이나 해양의 부유물질 분포를 평가하는데 활용되어 왔다(Choi and Kwon[1998]). 그리고 투명도는 해수의 청탁 외에 표면의 파랑, 기상상태, 일사 등의 영향을 받으며, 수계에 존재하는 고형물질이나 용존물질 등에 의하여 영향을 받는다

(Lee[2015]).

본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 투명도와 탁도, 부유물질과 탁도의 상관성을 Table 1과 같이 정리하였다. 표에서 SD는 투명도(feet), SS는 부유물질 농도(mm/l), T는 탁도(YSI 6026)이다. 투명도관을 이용한 투명도와 탁도는 강한 상관 관계가 있는 것으로 일반적으로 $y = as^x$ 의 역함수(Inverse function)로 표현되어 Table 1과 같이 다양한 연구자에 의해 제안되었다. 또한 하천, 호수 및 하구역의 탁도 크기는 보통 부유물질 농도에 비례하고 이때 탁도와 부유물질의 관계는 선형 회귀 분석을 통해 정량화될 수 있다(Rasmussen *et al.*[2009]).

결과적으로 본 연구에서는 위 식 (1)과 (4)에서 도출된 회귀식을 조합하여 다음과 같이 부유물질과 투명도의 상관식을 얻을 수 있다.

$$\log_{10}SS = -1.48038 \times \log_{10}(SD) + 2.44265 \quad (9)$$

2.3 군집분석(Cluster analysis)

군집분석이란 일반적으로 각 객체(대상)의 유사성을 측정하여 유사성이 높은 대상집단을 분류하고, 같은 군집에 속한 객체들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 객체간의 상이성을 규명하는 통계 분석방법이다. 대상들을 분류하기 위한 명확한 기준이 존재하지 않거나 기준이 밝혀지지 않은 상태에서 다양한 특성을 지닌 대상자들을 분석하는데 사용되는 기법이다.

본 연구에서는 해양환경측정망 데이터에서 제공된 47개 관측 정점에서 투명도와 부유물질 조사항목들을 바탕으로 각 정점별 공간적 특성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 수집된 데이터를 바탕으로 군집분석(Cluster analysis)을 수행하고, 군집분석 결과를 덴드로그램(Dendrogram)으로 제시한 후 그 특성에 대해서 고찰하였다.

수집된 데이터는 IBM SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)를 이용하여 군집분석을 수행하였으며 그 방법은 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis method)을 활용하였다. 또

Table 1. Regression formula between transparency, turbidity, and suspended matter of previous studies

Relationship	Eq. No.	Station name	Date	Regression equation	Data	Fresh- or saltwater	Source
Turbidity and Secchi depth	(1)	Willamette, Portland, U.S.	May 2013 ~Nov. 2017	$SD = 11.123 \times T^{-0.637}$	25	Freshwater	USGS homepage [2022]
	(2)	Narta Lagoon, Albania	Mar.~Oct. 2012	$SD = 2.87 \times T^{-0.36} (r^2 = 0.94)$	48	Saltwater	Cako <i>et al.</i> [2013]
	(3)	USACE Louisville, U.S.	May 2013 ~Nov. 2017	$SD = 2.0777 \times T^{-0.489} (r^2 = 0.6776)$	123	Freshwater	Xu <i>et al.</i> [2019]
Turbidity and suspended solids	(4)	Little Arkansas River, Kansas, U.S.	Nov. 1998 ~Jun. 2005	$\log_{10}SS = 0.943 + \log_{10}(T) + 0.130, (r^2 = 0.98)$	68	Freshwater	
	(5)	North Santiam River, Oregon, U.S.	Oct. 1998 ~Aug. 2004	$SS = 1.54 \times T^{1.04} (r^2 = 0.89)$	121	Freshwater	Rasmussen <i>et al.</i> [2009]
	(6)	C-51 Canal, Florida, U.S.	Nov. 2003 ~Dec. 2004	$\log_{10}SS = 0.75 + \log_{10}(T) + 0.30, (r^2 = 0.85)$	21	Freshwater	
	(7)	Mekong River, Cambodia	Jul. 2009 ~Mar. 2010	$SS = 0.8492T + 2.7191 (r^2 = 0.9505)$	34	Freshwater	Irvine <i>et al.</i> [2011]
	(8)	Krankešjón Lake, Sweden	Apr. ~ Nov. 2006	$SS = 0.58T - 2.5 (r^2 = 0.83)$	26	Freshwater	Lövstedt and Bengtsson[2008]

※ (T)SS: (Total) Suspended Solids, T: Turbidity, SD: Secchi Depth, r²: Adjusted coefficient of determination

한 본 연구에서는 군집의 구성원간 평균 거리가 가장 작은 군집을 결합하는 집단 간 연결(Between-groups linkage) 방법을 활용하였고, 측도(Measure)는 구간(Interval)의 제곱 유클리디안 거리(Squared euclidean distance) 방법을 적용하였다. 이 방법은 관측값과 추정값 사이의 제곱 거리 평균을 최소화하여 데이터 통계 추정치를 맞추는 표준 방법인 최소 제곱법에 사용된다.

최종적으로 본 연구에서는 조사자료의 항목별로 전 해역의 표·저층 부유물질량 자료를 모두 평균하여 통계분석을 수행하였다. 이상의 군집분석을 통해 해석한 결과를 바탕으로 부산 연안에서의 수질특성에 따른 해역분할도를 작성하고, 투명도와 부유물질량 수행에 따른 해역 환경 공간분포 특성에 대해서 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 투명도와 층별 부유물질 농도

본 연구에서는 부산 연안의 투명도와 부유물질 자료(2011~2020년의 10년 자료)에 대해서 두 항목간의 상호관련성을 살펴보고자 하였다. 수집된 전체 데이터는 총 2,171개에 해당하였다.

투명도와 표·저층 부유물질 농도의 분포 현황을 Fig. 2~Fig. 4에 각각 나타내었다. 먼저 Fig. 2는 수심에 따른 투명도의 분포를 나타낸 것으로 대체적으로 수심이 30 m 미만에 해당하는 관측정점이 많은 것을 알 수 있었고 투명도의 평균 값은 약 3.2 m이었다. 그리고 Fig. 3과 Fig. 4는 표층 및 저층의 부유물질 농도를 나타낸 것으로 평균 값은 각각 8.18 mg/L, 10.71 mg/L이었으며 대체적으로 수심 20 m 미만의 저층에서 약 80.0 mg/L에 달하는 부유물질이 관측되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6에서는 투명도와 표·저층 부유물질 농도와의 상관성을 살펴보고자 하였다. 투명도가 클수록 표·저층 부유물질 농도는 낮았다.

3.2 투명도와 부유물질의 특성치

Table 2는 47개 관측 정점별 자료수집 기간, 조사 정점 수심, 투명도와 표·저층 부유물질의 최대, 최소, 평균값을 계산한 결과이다.

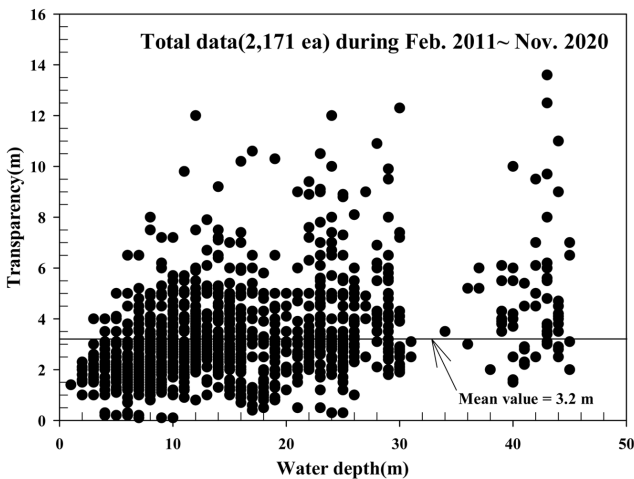


Fig. 2. Distribution of transparency observation results by water depth.

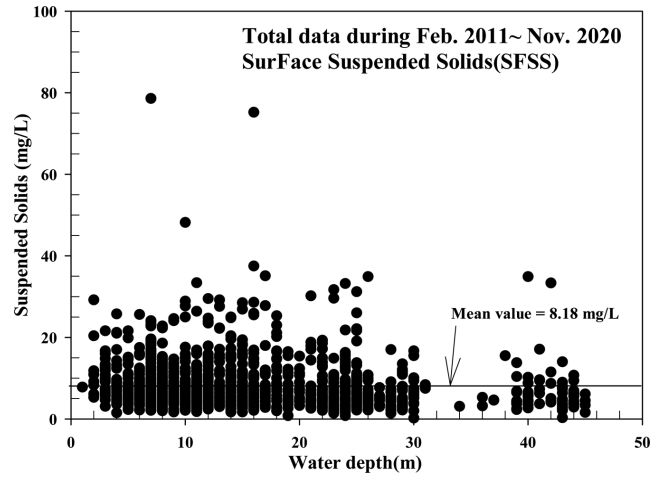


Fig. 3. Distribution of suspended solids observation results in the surface by water depth.

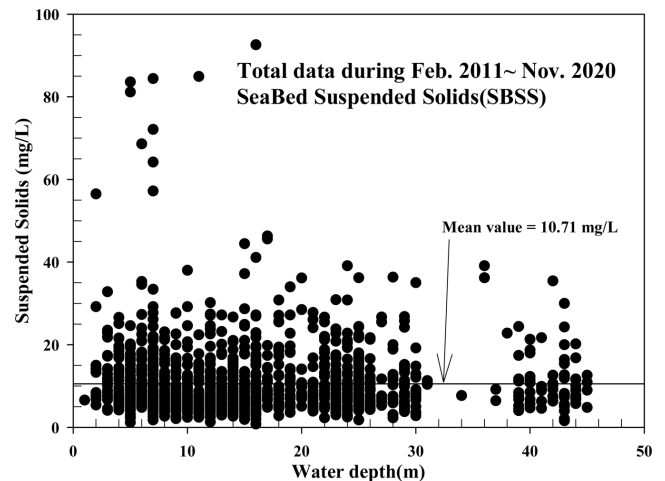


Fig. 4. Distribution of suspended solids observation results in the seabed by water depth.

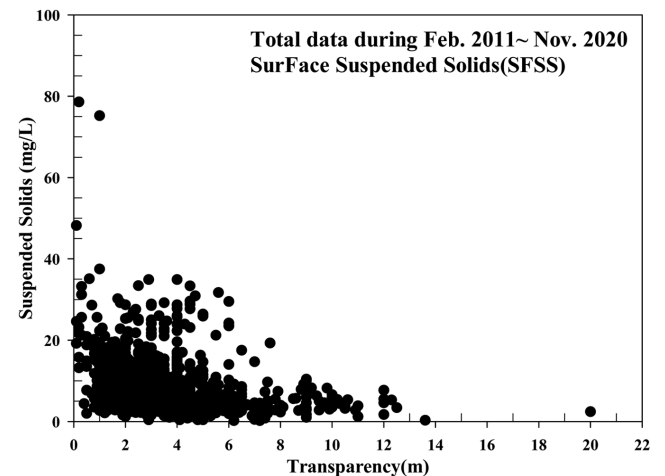


Fig. 5. The relationship between surface suspended solids and transparency.

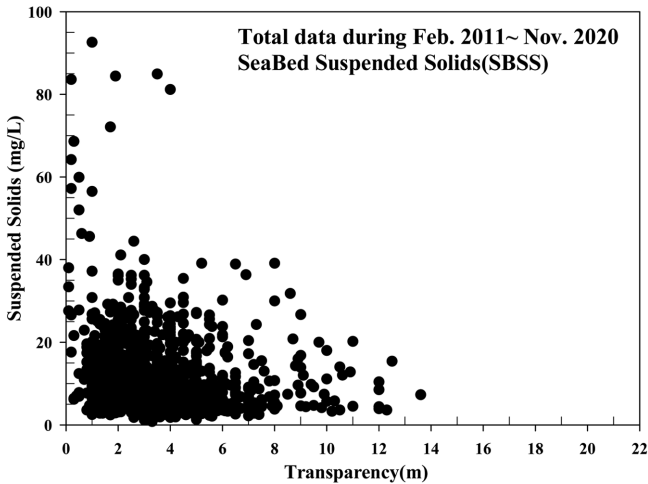


Fig. 6. The relationship between seabed(bottom) suspended solids and transparency.

여기서 평균값은 관측 기간동안의 전체 데이터의 평균값을 의미한다. 관측 조사 정점은 수심 10 m 미만 및 10~20 m가 각각 총 18개 정점, 수심 20~30 m가 총 10개 정점, 수심 40 m 이상이 1개 정점이었으며 최대 수심은 목도 주변 해역에서 42.95 m(St.29), 최소 수심은 낙동강 하류와 진우도 사이에서 3.79 m(St.36)이었다.

투명도의 경우, 최댓값 중 가장 큰 값은 St.29의 13.6 m, 가장 작은 값은 St.47의 2.5 m이었다. 또한 투명도 최솟값 중 가장 큰 값은 St.20의 2.6 m, 가장 작은 값은 0.1 m로서 St.34, St.35, St.38이었다. 관측 기간 동안의 전체 데이터의 평균값 중에서 최댓값은 St.29의 5.46 m, 최솟값은 St.45의 1.29 m이었다. Fig. 1에서 그 위치를 살펴보면 해수의 투명도가 가장 큰 정점은 다대포 몰운대 남측의 목도 해역이며 이에 반해 투명도가 가장 낮은 해역은 낙동강 하구둑 남측 및 다대포 서측 전면 해역에 해당하였다.

해수면 표층의 부유물질의 경우, 최댓값 중 가장 큰 값은 St.43의 78.6 mg/L, 가장 작은 값은 St.22의 14.9 mg/L이었다. 또한 해수면 표층의 부유물질 최솟값 중 가장 큰 값은 St.46의 6.0 mg/L, 가장 작은 값은 St.1의 0.2 mg/L이었다. 관측 기간 동안의 전체 데이터의 평균값 중에서 최댓값은 St.45의 15.77 mg/L, 최솟값은 St.1의 5.49 mg/L이었다.

해수면 저층의 부유물질의 경우, 최댓값 중 가장 큰 값은 St.45의 92.6 mg/L, 가장 작은 값은 St.11의 12.5 mg/L이었다. 또한 해수면 저층의 부유물질 최솟값 중 가장 큰 값은 St.46의 6.6 mg/L, 가장 작은 값은 St.22의 0.8 mg/L이었다. 관측 기간 동안의 전체 데이터의 평균값 중에서 최댓값은 St.45의 20.05 mg/L, 최솟값은 St.11의 6.68 mg/L이었다.

이상의 부유물질 농도 수치를 바탕으로 Fig. 1에서 그 위치를 살펴보면 해수의 부유물질 농도가 가장 큰 정점은 표층에서는 낙동강 하구둑 전면 해역이고 저층의 경우 부산 신항 내측 해역이었다. 이에 반해 부유물질 농도가 가장 낮은 해역은 부산 남항, 수영강 하류 및 기장군 고리원전 전면 해역에 해당하였다.

3.3 투명도와 부유물질의 경년변동

투명도는 해수중 현탁물질의 양에 따라 변화되고, 수온, 육생물질의 주입량, 풍량, 조석류, 지형 등에 따라 부차적인 영향을 받는 것이므로 연안해역에서는 그 양상이 매우 복잡할 것으로 예측된다(Choe and Chung[1971]). Choi and Kwon[1998]은 서해 남동해역에서 투명도는 겨울에는 해수면 냉각과 바람에 의한 상하층 연직 혼합으로 저층 퇴적물의 재부유가 활발하여 투명도가 낮게 나타나고, 여름에는 해수면 가열에 의해서 상하층 사이에 형성되는 수온 혹은 밀도 약층과 조석 혼합을 방해하는 태양 복사열의 증가로 인하여 저층 퇴적물의 재부유가 방해되어 투명도가 높다고 보고하였다.

Fig. 7은 47개 정점 중에서 최대, 최솟값을 보였던 6개 정점(St.01, St.11, St.22, St.29, St.43, St.45)에 대해서 과거 10년 동안 투명도와 표층 및 저층의 부유물질 농도 변화에 대한 시계열을 나타낸 것이다. 6개 정점 중 해수의 투명도가 가장 큰 곳은 다대포 몰운대 남측의 목도 해역(St.29)이었고 가장 낮은 곳은 낙동강 하구둑 주변 해역(St.43) 및 부산 신항 내측 해역(St.45)이었다. 부유물질 농도가 가장 낮은 해역은 부산 남항(St.22), 수영강 하류(St.11) 및 기장군 고리원전 주변 해역(St.01)이었다.

먼저 Fig. 7(a)에서 투명도의 정점별 계절 특징을 살펴보면 11월에 높고 2월과 5월에 낮은 특징을 보였다. 또한 8월에 St.01, St.22, St.29에서 투명도가 다른 정점에 비해 크게 상승하는 경향을 보였다. 특히 St.29에서 다른 정점보다는 계절적 차이가 두드러지게 나타났다. St.45에서는 대체적으로 약 2 m 정도의 투명도를 나타내어 계절적 변화를 찾아 볼 수 없었다. 이는 Choi and Kwon[1998]가 주장한 서해 남동해역에서의 투명도의 분포는 계절에 관계없이 등수심선과 유사하게 뚜렷한 동서 대비를 보이고 있다는 내용과 유사하였다. 즉, 본 연구의 결과는 대상해역이 극천해의 수심이 낮은 연안 해역으로서 지질·수리학적 조건과 아울러 항만공사 및 하천수 유입과 같은 영향에 따른 것으로 생각된다. 또는 일반적으로 연안 성층(Stratification) 현상이 하계의 연안수 유입과 큰 태양복사 에너지에 기인하여 강한 성층화를 형성하게 되는데 투명도가 높은 St.01, St.22, St.29에 대해서 하계 수온상승에 의한 수온 성층화, 담수유입 및 대기로부터의 강수유입에 의한 염도 성층화 현상과 연계하여 추가 검토할 필요가 있다고 생각된다.

Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 표층 및 저층 부유물질의 정점별 계절별 특징을 살펴보기 위한 시계열을 나타낸 것이다. 특징적인 것은 투명도가 가장 낮은 St.45에서 대체적으로 부유물질 농도가 다른 정점보다 11월에 표층과 저층에서 가장 높게 나타났다. 이는 부산 신항 수역에 위치한 무인도 토도의 제거 공사가 2017년 7월에 시작하여 2020년 5월에 완료된 점을 고려하면 St.45에서는 보이는 2012년 11월 표·저층의 고농도 부유물질 발생은 다른 요인에 기인한 것으로 판단된다.

3.4 투명도와 부유물질의 상관 분석

본 연구에서는 수집된 부산 연안의 관측데이터인 Table 2의 투

Table 2. Maximum, minimum, and average values of transparency and suspended solids at the survey points

Station	Number of data	Date(yy.mm)	Depth (m)	Transparency(m)			Suspended Solids(mg/L)					
				Max.	Min.	Ave.	SurFace(SFSS)			SeaBed(SBSS)		
							Max.	Min.	Ave.	Max.	Min.	Ave.
01	40	2011.02~2020.11	28.1	10.9	1.8	4.19	18.6	0.2	5.49	36.35	2.3	10.76
02	40	2011.02~2020.11	28.83	12.3	1.8	4.46	16.7	2.0	5.86	35.0	3.1	10.17
03	40	2011.02~2020.11	14.35	7.2	1.3	3.6	17.1	1.7	6.32	27.1	2.7	9.53
04	20	2011.02~2020.08	6.8	5.0	1.9	3.22	25.75	2.3	6.98	34.6	1.2	9.89
05	40	2011.02~2020.11	21.9	10.3	1.5	4.05	26.0	0.8	6.23	36.15	2.5	11.24
06	40	2011.02~2020.11	17.48	10.6	0.8	3.88	27.8	0.8	7.22	34.0	2.5	9.33
07	32	2013.02~2020.11	13.38	12.0	1.0	3.91	20.4	2.6	8.02	21.0	2.8	8.5
08	32	2013.02~2020.11	22.13	7.6	1.5	3.74	19.3	1.4	7.09	26.1	2.3	10.02
09	32	2013.02~2020.08	15.31	9.2	1.3	3.88	18.1	2.4	7.58	24.9	2.0	9.87
10	40	2011.02~2020.11	11.58	9.8	1.2	3.74	23.9	2.2	7.15	24.6	2.7	8.16
11	32	2013.02~2020.11	6.91	5.3	1.0	3.01	22.8	1.7	8.22	12.5	2.5	6.68
12	40	2011.02~2020.11	9.65	6.2	1.0	3.31	16.9	2.1	6.43	15.2	2.4	7.1
13	32	2013.02~2020.11	8.28	8.0	0.8	3.4	17.0	2.2	7.08	22.0	2.1	8.02
14	32	2013.02~2020.11	39.81	10.0	1.5	4.27	34.9	2.3	7.8	39.1	4.05	12.89
15	32	2013.02~2020.11	10.84	7.5	1.8	4.17	29.5	1.8	6.28	30.2	1.3	7.95
16	40	2011.02~2020.11	14.8	7.4	1.5	3.49	25.9	2.6	7.16	27.2	3.0	8.22
17	32	2013.02~2020.11	11.09	7.1	1.0	3.15	37.5	2.8	9.38	29.2	3.6	8.6
18	16	2013.02~2020.11	14.38	6.1	1.9	3.24	28.5	3.0	10.27	28.7	3.4	9.73
19	34	2011.02~2020.11	13.85	6.1	2.0	3.68	29.2	2.6	7.5	27.2	3.7	8.11
20	16	2013.02~2020.11	11.19	7.5	2.6	4.62	23.5	2.2	7.35	23.8	3.4	6.96
21	40	2011.02~2020.11	22.78	10.5	1.2	3.98	21.7	2.0	6.48	26.65	3.6	9.41
22	32	2013.02~2020.11	15.66	10.2	1.5	3.79	14.9	2.1	6.59	44.45	0.8	9.55
23	20	2011.02~2020.11	7.8	6.5	1.2	3.65	17.5	1.5	6.56	24.6	1.8	8.79
24	16	2013.02~2020.11	7.38	5.0	1.7	3.51	24.1	2.2	7.89	20.17	3.4	8.03
25	40	2011.02~2020.11	24.85	9.1	1.5	3.5	34.9	2.3	7.78	39.1	4.05	12.55
26	32	2013.02~2020.11	14.31	5.2	2.0	3.6	25.0	1.7	7.94	23.2	1.9	7.96
27	20	2011.02~2020.11	13.25	5.1	1.8	3.3	24.8	3.3	10.19	27.4	2.95	9.27
28	16	2013.02~2020.11	11.94	5.0	2.2	3.5	27.6	2.8	9.87	16.85	3.7	8.3
29	40	2011.02~2020.11	42.95	13.6	1.6	5.46	33.35	0.3	5.98	35.45	1.6	11.02
30	32	2013.02~2020.11	11.53	4.5	1.7	3.09	24.7	2.4	7.45	18.1	2.6	7.96
31	16	2013.02~2020.11	9.75	4.7	2.0	3.18	33.4	2.3	9.96	27.7	4.0	9.71
32	40	2011.02~2020.11	5.71	3.8	0.3	2.19	25.6	3.4	8.46	68.6	3.15	14.46
33	40	2011.02~2020.11	6.96	3.5	0.2	2.05	23.2	3.2	8.68	57.2	4.9	12.81
34	40	2011.02~2020.11	7.21	3.0	0.1	1.96	19.2	2.4	8.25	35.3	4.0	12.21
35	24	2015.02~2020.11	9.08	3.5	0.1	1.99	48.2	2.1	9.43	38.0	4.7	9.93
36	24	2015.02~2020.11	3.79	3.0	0.2	1.77	16.0	4.75	8.34	26.6	4.9	12.01
37	24	2015.02~2020.11	4.75	3.0	0.3	1.75	21.2	2.6	8.4	25.1	4.8	12.69
38	24	2015.02~2020.11	7.88	2.8	0.1	1.72	24.6	2.1	8.94	27.6	5.4	11.81
39	24	2015.02~2020.11	5.58	3.0	0.2	1.61	17.0	3.3	8.35	27.3	4.8	12.6
40	24	2011.02~2020.11	24.63	12.0	0.3	3.93	31.2	1.7	7.39	30.9	1.8	8.79
41	24	2011.02~2020.11	24.35	7.8	0.3	3.42	33.2	2.15	7.35	25.5	4.25	9.56
42	24	2011.02~2020.11	22.63	12.0	0.5	3.65	31.7	2.1	9.44	30.8	3.0	12.51
43	24	2015.02~2020.11	4.29	4.0	0.2	2.23	78.6	3.6	11.3	84.9	4.1	18.34
44	24	2015.02~2020.11	5.79	4.0	0.2	2.11	22.8	3.8	9.82	83.6	4.0	18.85
45	40	2011.02~2020.12	16.45	4.0	0.4	1.29	75.2	2.0	15.77	92.6	3.6	20.05
46	31	2004.08~2020.11	16.9	3.0	0.8	1.44	30.0	6.0	12.56	53.8	6.6	19.44
47	40	2011.02~2020.12	8.3	2.5	0.8	1.74	18.6	2.3	9.96	84.4	3.3	13.05
Total mean value			14.41			3.20			8.18			10.71

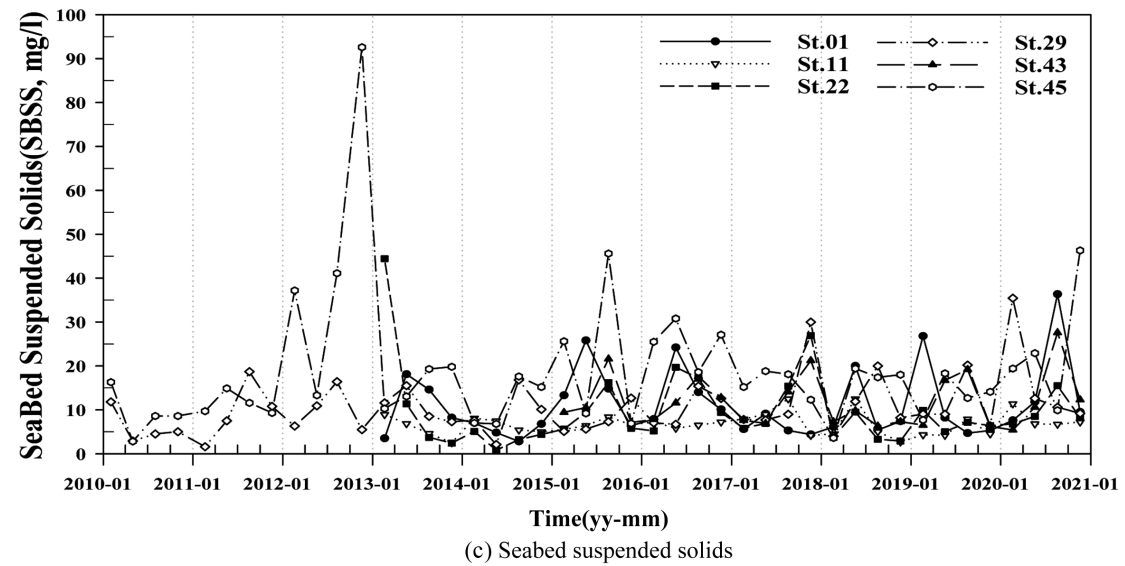
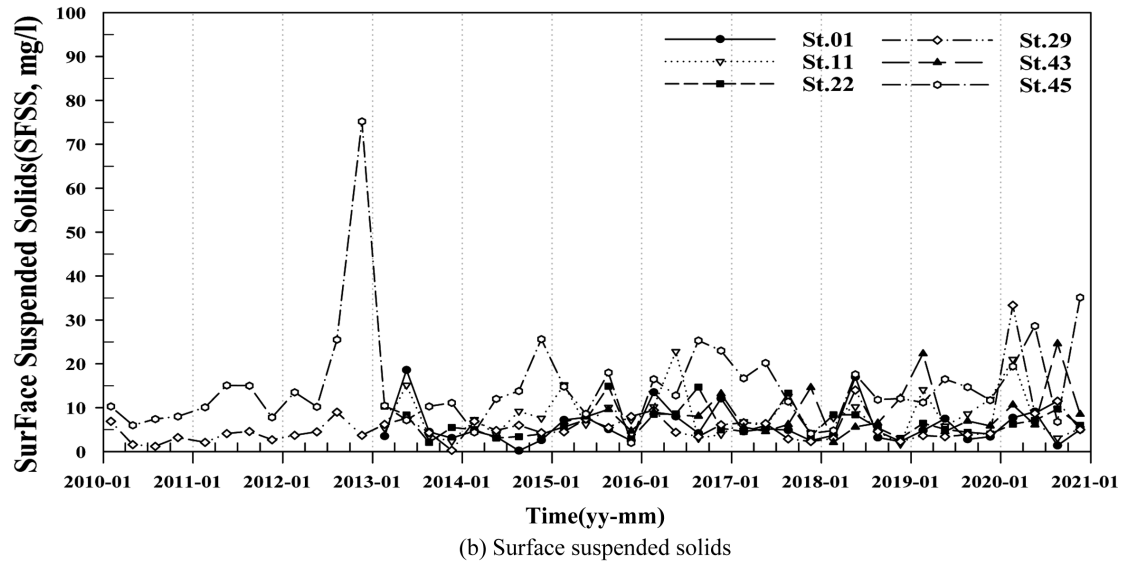
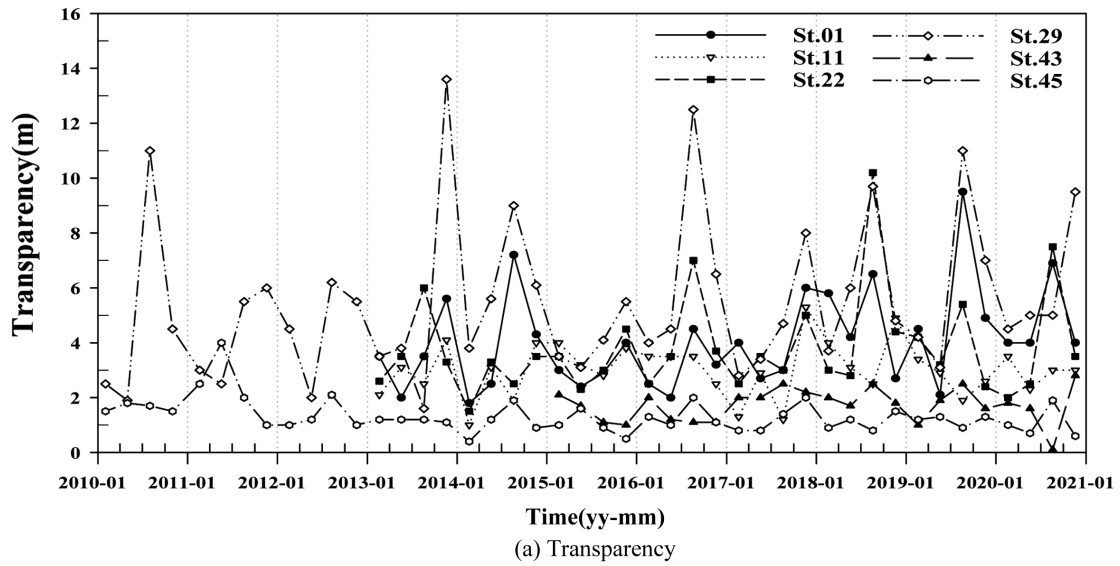


Fig. 7. Transparency and suspended solids time series at representative survey points.

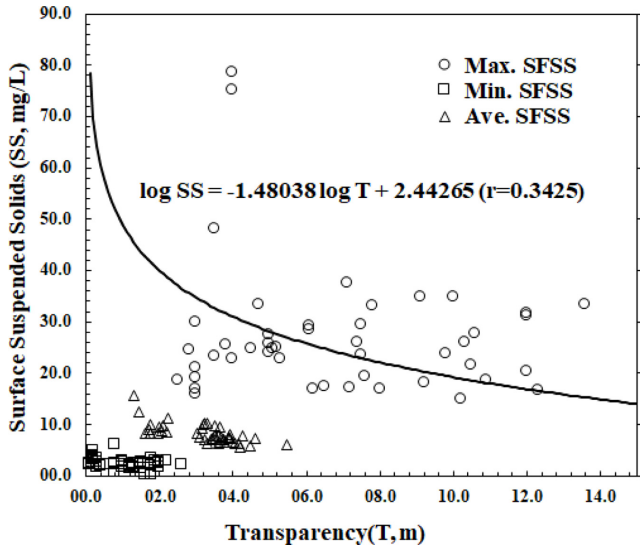


Fig. 8. Correlation between transparency and surface suspended solids.

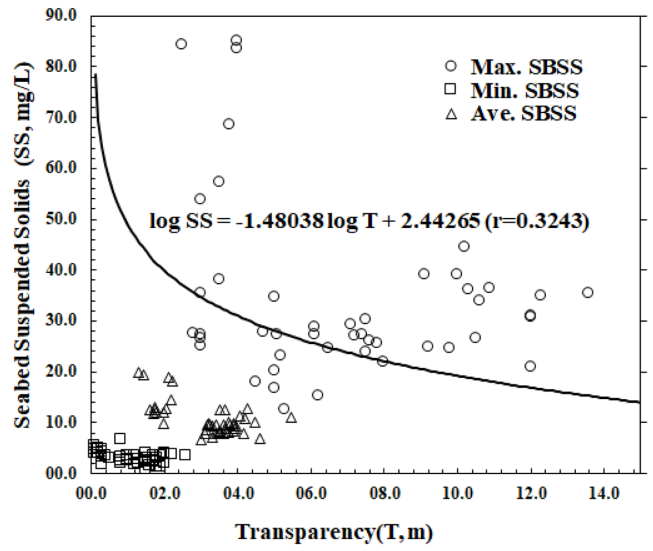


Fig. 9. Correlation between transparency and seabed suspended solids.

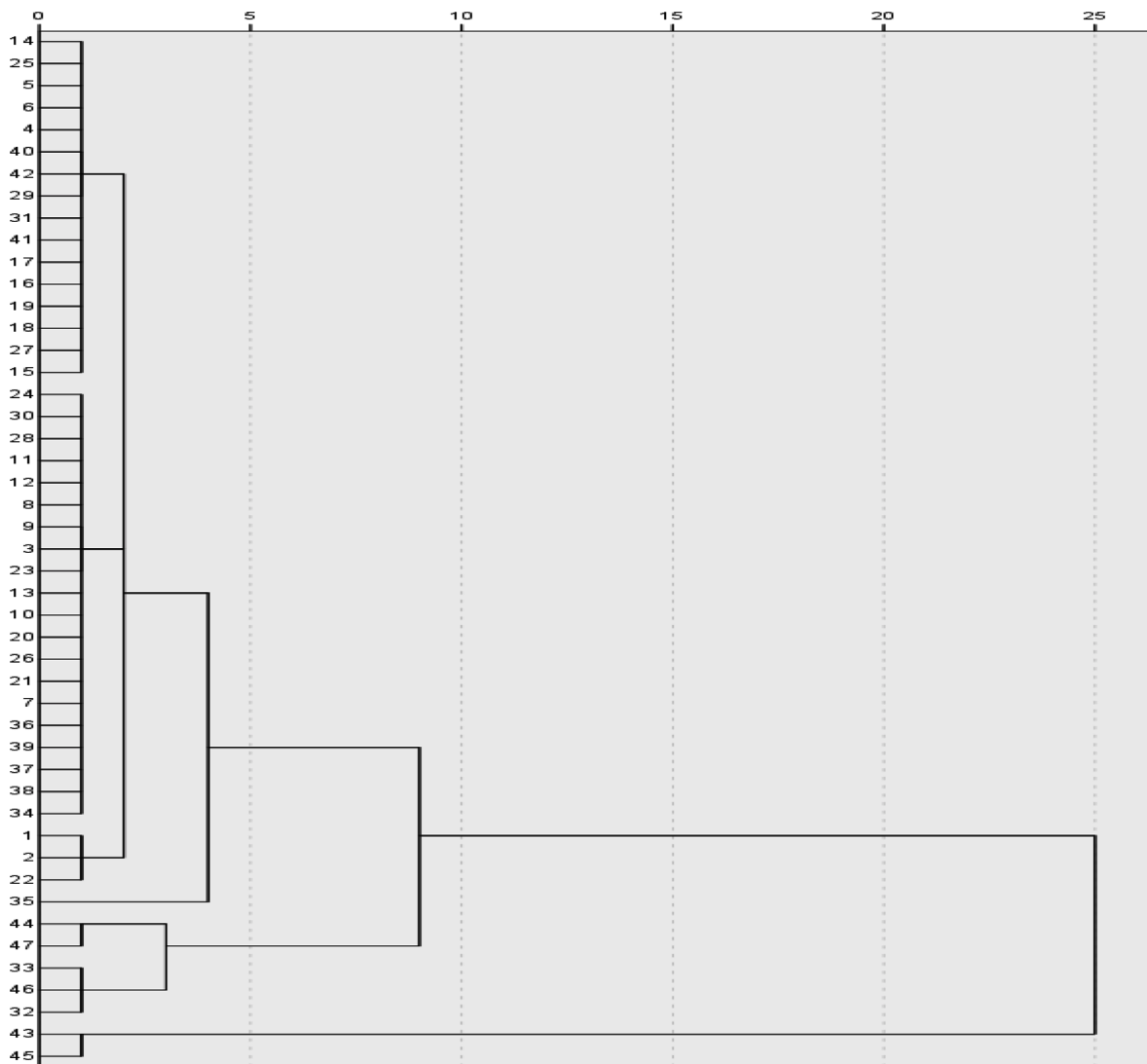


Fig. 10. Dendrogram according to cluster analysis of water quality data.

Table 3. Cluster classification results using transparency and suspended solids data in the Busan coastal waters

Cluster	Station No.	Transparency (m)			Suspended Solids (mg/L)					
					SurFace(SFSS)			SeaBed(SBSS)		
		Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.	Max.	Min.	Aver.
1	01, 02, 22	11.13	1.7	4.15	16.73	1.43	5.98	38.6	2.07	10.16
2	03, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 20, 21, 23, 24, 26, 28, 30, 34, 36, 37, 38, 39	6.22	1.13	3.17	20.88	2.31	7.69	23.43	3.19	9.33
3	04, 05, 06, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 25, 27, 29, 31, 40, 41, 42	8.4	1.37	3.72	30.48	2.07	7.93	31.45	2.93	9.96
4	35	3.5	0.1	1.99	48.2	2.1	9.43	38.0	4.7	9.93
5	32, 33, 46	3.43	0.43	1.89	26.27	4.2	9.9	59.87	4.88	15.57
6	44, 47	3.25	0.5	1.93	20.7	3.05	9.89	84.0	3.65	15.95
7	43, 45	4.0	0.3	1.76	76.9	2.8	13.54	88.75	3.85	19.2

명도와 부유물질 농도의 최대, 최소, 평균값을 바탕으로 두 수질 자료의 상호 상관성 및 식 (9)와의 관계를 살펴보았다(Fig. 8, Fig. 9).

투명도가 클수록 부유물질 농도는 낮아지는 일반적인 경향을 보이나, 분산도는 표층보다는 저층에서 크게 나타났다. 또한 식 (9)의 회귀식과 비교할 때 최소 또는 평균값에 비해 최댓값의 경우가 회귀식에 근접한 분포를 가지고 있음을 알 수 있다. 하지만 회귀식과 최댓값과의 오차가 다소 크기 때문에 식 (9)를 사용하여 해역의 투명도와 부유물질의 상호 상관성을 평가하기에는 다소 무리가 있으므로 타 연구에서 이를 활용할 경우 적용 식에 대한 한계를 이해하고 추가 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.5 군집분석 결과

부산 연안에서 약 10년 동안 자료를 바탕으로 군집분석에 의한 덴드로그램(Dendrogram)과 7개 클러스터(Cluster)로 구분하여 관측 정점 및 투명도와 부유물질의 최대, 최소, 평균값들의 평균치를 나타내었다(Fig. 10, Table 3).

Fig. 11은 Table 3에 제시된 각 클러스터별 투명도 및 부유물질 농도의 최대, 최소, 평균값의 차이를 막대그래프로 제시한 것이다.

먼저 투명도를 나타내는 Fig. 11(a)를 살펴보면 클러스터 1의 최댓값이 11.13 m로 가장 크고 다음으로 클러스터 3의 8.4 m, 클러스터 2의 6.22 m의 순이었다. 나머지 클러스터에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 해수면 표층의 부유물질을 나타내는 Fig. 11(b)를 살펴보면 클러스터 7의 최댓값이 76.9 mg/L로 가장 크고 다음으로 클러스터 4의 48.2 mg/L의 순이었다. 나머지 클러스터에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 그리고 해수면 저층의 부유물질을 나타내는 Fig. 11(c)를 살펴보면 클러스터 7의 최댓값이 88.75 mg/L로 가장 크고 다음으로 클러스터 6의 84.0 mg/L, 클러스터 5의 59.87 mg/L의 순이었다. 클러스터 2에서 23.43 mg/L로 가장 낮은 값을 나타내었다.

결과적으로 투명도가 큰 클러스터 1~3에서 표·저층의 부유물질 농도가 낮고 투명도가 작은 클러스터 4~7에서 표·저층의 부유물질 농도가 높은 경향임을 알 수 있다. 하지만 클러스터 5와 6의 경우 저층과는 달리 표층에서의 최대 부유물질 농도가 낮은 반면 평

균값은 다른 클러스터와 크게 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 클러스터 5와 6은 관측 정점이 St.32, St.33, St.44, St.46, St.47인데 이는 낙동강 하구둑 바로 앞 정점, 부산 신항 해역, 가덕도 남동측 해역에 해당한다.

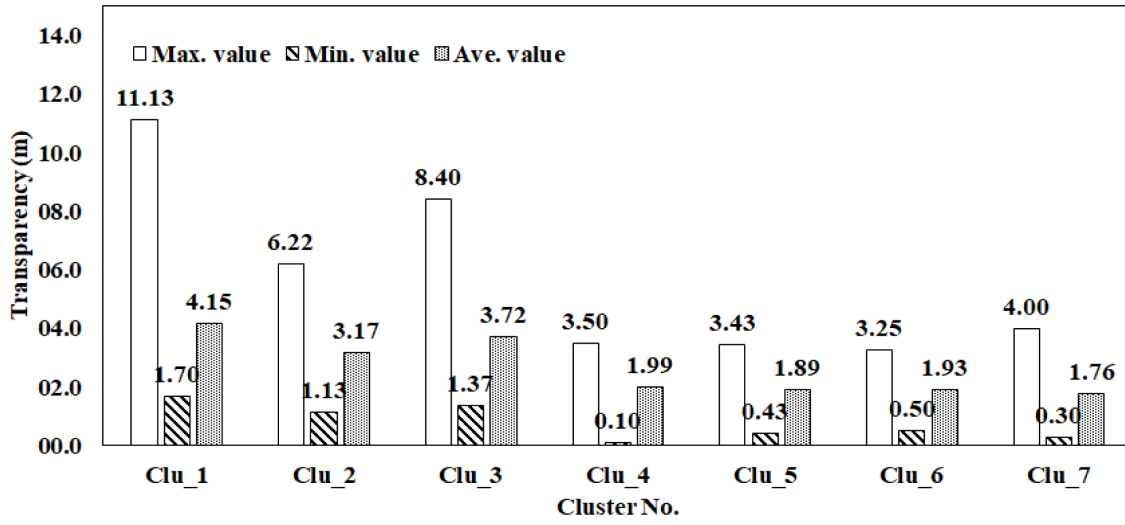
또한 Table 3에 제시된 각 클러스터별 관측 조사정점 위치를 보다 상세히 살펴보면 Fig. 12와 같이 제시할 수 있다. 그림에서 부산 연안 해역의 투명도와 부유물질 농도 공간 특성을 살펴보면 수영만과 부산 남항, 해운대~대변항과 부산항 해역이 유사한 수괴 특성을 보였다. 하지만 기장군 고리원전 주변 해역은 2개, 낙동강 하구역은 5개, 부산 신항은 3개 클러스터가 존재함으로써 다소 수괴 특성이 명확하지 않은 것으로 생각된다. 이는 관측 자료가 1년에 4회(2,5,8,11월)로 한정되어 있고, 일부 누락된 자료에 의해서 생기는 불명확함 때문이라 판단된다. 하지만 기장군 고리원전 해역은 정관신도시 건설에 따른 좌광천을 통해 흙탕물 유입, 낙동강 하구역의 경우 매년 홍수시 다량의 하천유량에 의한 변동성, 부산 신항 해역의 경우 운항선박 프로펠러에 의한 저층 퇴적물의 재부유, 매립 및 항내 준설에 따른 항만공사의 영향으로 추정된다.

4. 요약 및 결론

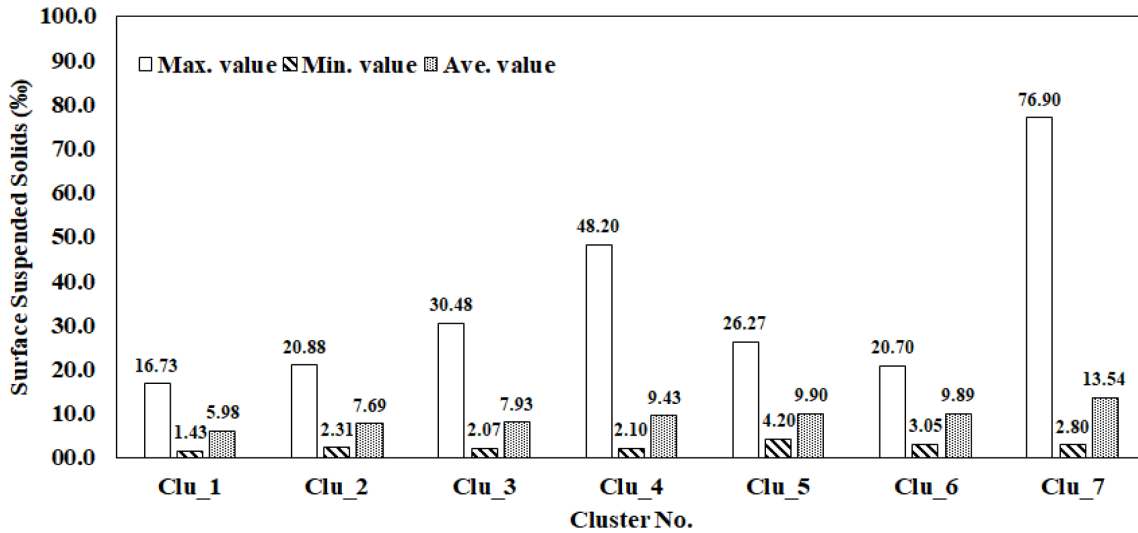
본 연구에서는 해양환경정보포털에서 제공되는 최근 10년 동안의 부산 연안 해수에 대한 투명도와 부유물질 관측자료를 이용하여 부산 연안 해양환경 특성을 살펴보았다.

1) 투명도, 탁도, 부유물질과의 상호 회귀식에 대한 선행 연구자들의 연구결과를 바탕으로 부유물질과 투명도의 상관식을 $\log_{10}SS = -1.48038 \times \log_{10}(SD) + 2.44265$ 와 같이 도출하였다. 하지만 부산 연안 해역의 투명도와 부유물질과의 상관성을 살펴본 결과, 회귀식과 최댓값과의 오차가 다소 크기 때문에 타 연구에서 이를 활용할 경우 적용 식에 대한 한계를 이해하고 추가 검토가 필요할 것으로 사료된다.

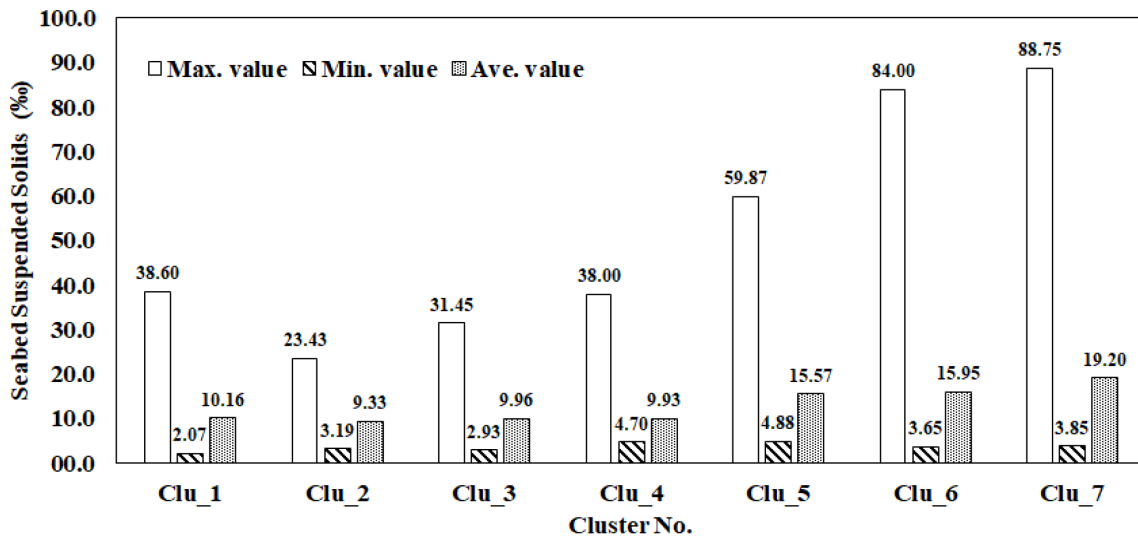
2) 부산 연안에서 투명도의 평균 값은 약 3.2 m, 표층 및 저층의 부유물질 평균 농도는 각각 8.18 mg/L, 10.71 mg/L에 해당하였다. 모든 관측 정점에서 투명도가 최댓값을 보이는 곳은 다대포 물론대 남측의 목도 해역으로서 13.6 m이며, 투명도가 가장 낮은 해역은



(a) Transparency



(b) Surface suspended solids



(c) Seabed suspended solids

Fig. 11. Comparison of maximum, minimum, and average values of transparency and suspended solids concentration for each cluster.

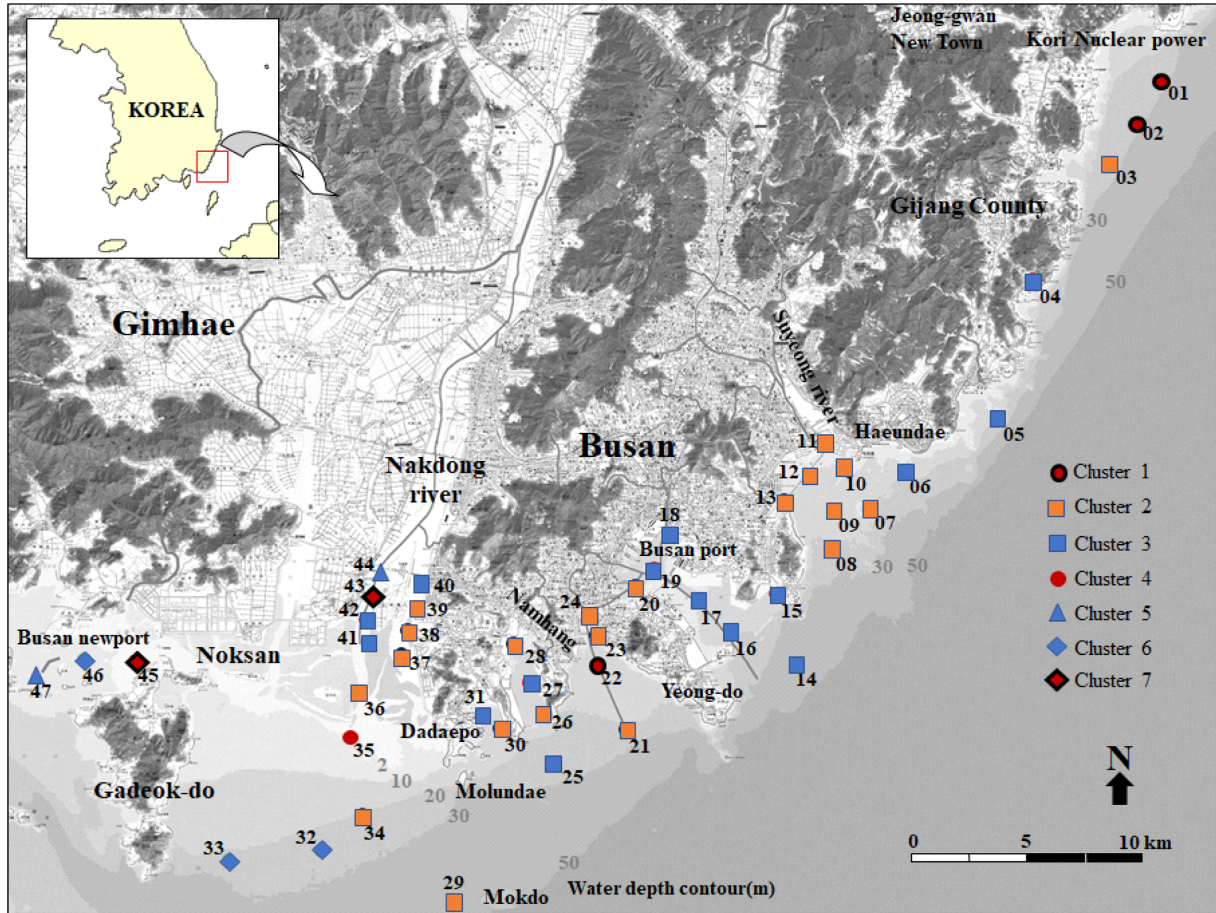


Fig. 12. Spatial distribution characteristics of transparency and suspended solids concentration by cluster in Busan coastal waters.

0.1 m로서 낙동강 하구둑 남측 및 다대포 서측 전면 해역에 해당하였다.

3) 낙동강 하구둑에서 78.6 mg/L, 저층에서는 부산 신항 내측에서 92.6 mg/L이었다. 반면 부유물질 농도가 가장 낮은 곳은 부산 남항, 수영강 하류 및 기장군 고리원전 해역이었다.

4) 군집분석 결과, 7개의 군집으로 구분되었고 이를 통해 해역 수괴를 분석할 수 있었는데 수영만과 부산 남항, 해운대-대면항과 부산항에서 유사한 특성을 보였다. 하지만 기장군 고리원전은 2개, 낙동강 하구역은 5개, 부산 신항은 3개 클러스터가 존재함으로써 다소 해역 환경 특성이 명확하지 않은 것으로 생각된다.

한편, 본 연구에서 도출된 투명도와 부유물질간의 상호 회귀식은 관측된 원본 자료의 측정시 지질·수리학적 조건, 측정과 관련한 기기와 반복측정에 대한 신뢰도, 탁도 측정과 부유물질량과의 불일치 되는 점 및 탁도계의 신뢰성 등 다양한 제약조건을 반영하지 않은 결과로서 다소 한계를 가지고 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Bash, J., Berman, C. and Bolton, S., 2001, Effects of turbidity and suspended solids on salmonids. Final research report, Washington State Transportation Center, USA, 1-66.
- [2] Cako, V., Baci, S. and Shena, M., 2013, Water Turbidity as One of the Trophic State Indices in Butrinti Lake, J. Water Res. Prot., 1144-1148.
- [3] Cho, H.Y. and Kim, B.O., 2003, Turbidity Meter Calibrations Based on Grain Size Distribution of Trapped Suspended Material, J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 15(1), 33-38.
- [4] Choe, S. and Chung, T.W., 1971, Oceanological characteristics of the KO-RI sea area, I. Annual cyclic changes in water temperature, salinity, pH and transparency, J. Oceanol. Soc. Korea, 6(1), 37-48.
- [5] Choi, Y.K. and Kwon, J.N., 1998, Seasonal variation of transparency in the Southeastern Yellow Sea, J. Korean Fish. Soc., 31(3), 323-329.
- [6] Jang, I.S., Won, D., Baek, W., Shin, C. and Lee, S.H., 2015, Turbidity Characteristics of Korean Port Area, J. Korea Academia-Industrial cooper. Soc., 16(12), 8889-8895.
- [7] Irvine, K.N., Richey, J.E., Holtgrieve, G.W., Sarkkula, J. and

- Sampson, M., 2011, Spatial and temporal variability of turbidity, dissolved oxygen, conductivity, temperature, and fluorescence in the lower Mekong River-Tonle Sap system identified using continuous monitoring, *Int. J. River Basin Manag.*, 9, 151-168.
- [8] Lee, J.W., Maeng, J.H., Cho, K.W., Yang, G.W. and Kim, Y.S., 2003, The movement characteristics of suspended solid(SS) in harbor construction(I) - In a riprap work, *J. Korean Soc. Mar. Env. Eng.*, 6(2), 38-45.
- [9] Lee, K.S., 2015, Review on the Biological Effects of Suspended Solids on Shellfish, Fish, and Seaweed, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 21(1), 109-118.
- [10] Löfstedt, C.B. and Bengtsson, L., 2008, The role of non-prevailing wind direction on resuspension and redistribution of sediments in a shallow lake, *Aquat. Sci.*, 70, 304-313.
- [11] Ministry of Oceans and Fisheries, Marine Environment Information Portal homepage, <https://www.meis.go.kr/portal/main.do/>.
- [12] Ohata, R., Masuda, R., Ueno, M., Fukunishi, Y. and Yamashita, Y., 2011, Effects of turbidity on survival of larval ayu and red sea bream exposed to predation by jack mackerel and moon jellyfish, *Fish. Sci.*, 77, 207-215.
- [13] Pickard, G.L. and Emery, W.J., 1990, Descriptive physical oceanography, An introduction 5th Ed., Pergamon press, 320pp.
- [14] Rasmussen, P.P., Gray, J.R., Glysson, G.D., and Ziegler, A.C., 2009, Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data, U.S. Geological Survey Techniques and Methods book 3, chap.C4, 53 p.
- [15] U.S. Geological Survey(USGS), Oregon Water Science Center homepage, https://or.water.usgs.gov/will_morrison/secchi_depth_model.html/.
- [16] Xu, M., Liu, H., Beck, R., Reif, M., Emery, E. and Young, J., 2019, Regional analysis of lake and reservoir water quality with multispectral satellite remote sensing images, Technical Report, U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, ERDC/EL TR-19-19.

Received 20 May 2022

1st Revised 15 July 2022, 2nd Revised 19 August 2022

3rd Revised 14 September 2022, 4th Revised 16 September 2022

Accepted 19 September 2022