

부산연안 부유물질 장기 변동 및 공간분포 연구

윤한삼¹ · 강태순^{2,†}

¹국립부경대학교 학부대학 교수
²주지오시스템리서치 전문이사

A Study on Long-term Variation and Spatial Distribution of Suspended Solids Along the Busan Coast

Hansam Yoon¹ and Taesoon Kang^{2,†}

¹Professor, College of Liberal Arts, Pukyong National University, Busan 48513, Korea
²Executive Director, GeoSystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi-do 15807, Korea

요 약

본 연구는 부산 연안 해수의 표층 및 저층 부유물질 관측자료를 활용하여 수층 간 상호 관련성 및 공간적 분포 특성을 분석하고, 낙동강 하천수로부터 멀어짐에 따라 부유물질의 공간 분포가 어떻게 변화하는지 검토하였다. 해양수산부 해양환경측정망에서 15년간 수집된 총 672개의 관측 자료를 기반으로 분석을 수행하였다. 분석 결과, 부산 연안의 부유물질 평균 농도는 표층에서 6.97 mg/L, 저층에서 11.65 mg/L로 나타났다. 전체 데이터에 대한 표층과 저층 부유물질 농도 간의 결정계수(R^2)는 0.1038, 전반적인 상관성은 크지 않는 것으로 나타났지만 개별 정점에서는 유의미한 상관성을 보였다. 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에서 가장 높은 0.458의 R^2 값을 기록했으며, 이는 낙동강 하천수의 영향을 시사한다. 또한 수영만 전면 해역(정점 Q6)에서도 0.3834의 상대적으로 높은 R^2 값이 관측되었는데, 이는 수영강의 영향을 지배적으로 받는 것으로 판단된다. 표층과 저층의 부유물질이 동일 시점에서 변동하는 구역은 주로 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)부터 영도 전면 해역(정점 Q9)까지였다. 낙동강으로부터 멀어짐에 따라 관측정점의 표층과 저층 부유물질 간 상호 관련성은 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 낙동강 하천수에 의한 부유물질의 직접적인 영향은 영도 서측 해역까지의 일정 구역에 주로 미치는 것으로 추측된다. 그 외 영도 동측 해역부터는 다른 해양물리 환경에 의해 영향을 받으며, 특히 수영만 전면 해역(정점 Q6)의 경우 국지적인 하천수(수영강) 유입에 의해 표층-저층 부유물질 간 상대적으로 높은 상관성을 보이는 복잡한 해양환경 특성을 나타내었다. 본 연구는 일부 관측정점 자료를 바탕으로 한 해석으로, 최종 결과 도출에 한계점이 있음을 밝히며, 추가적인 연구가 필요하다.

Abstract – This study analyzed the interlayer correlation and spatial distribution characteristics of suspended solids in surface and bottom waters along the Busan coasts, using observational data. It also examined how the spatial distribution of suspended solids changes with increasing distance from the Nakdong River. The analysis was based on a total of 672 observations collected over 15 years from the Marine Environmental Monitoring Network of the Ministry of Oceans and Fisheries. The results showed that the average concentration of suspended solids in the Busan coastal waters was 6.97 mg/L in the surface layer and 11.65 mg/L in the bottom layer. The coefficient of determination (R^2) between surface and bottom concentrations across all data was 0.1038, indicating a generally weak correlation. However, significant correlations were observed at individual stations. The highest R^2 value of 0.458 was recorded at station Q12, located in the front sea area of the Nakdong River estuary, suggesting a strong influence from the river. A relatively high R^2 value of 0.3834 was also observed at station Q6, located in the front sea area of Suyeong Bay, likely due to the dominant influence of the Suyeong River. Areas where surface and bottom suspended solids fluctuated simultaneously were mainly between station Q12 (Nakdong River estuary) and station Q9 (front sea of Yeongdo). As the distance from the Nakdong River increased, the interlayer correlation of suspended solids tended to decrease. These findings suggest that the direct influence

[†]Corresponding author: kangts@geosr.com

of suspended solids from the Nakdong River is primarily limited to a specific area extending to the western sea of Yeongdo. Beyond this, starting from the eastern sea of Yeongdo, other oceanographic factors appear to play a more significant role. In particular, station Q6 in Suyeong Bay exhibits complex marine environmental characteristics, with relatively high interlayer correlation due to localized river inflow from the Suyeong River. This study is based on data from selected observation stations, and acknowledges limitations in deriving definitive conclusions. Further research is needed.

Keywords: Busan coast(부산 연안), Nakdong river water(낙동강 하천수), Observation data(관측 자료), Suspended solids(부유물질), Spatial distribution(공간분포)

1. 서 론

일반적으로 부유물질(Suspended Solids, SS)은 수계에 존재하는 입자지름 2 mm 이하로 물에 용해되지 않는 물질을 의미하며 이와 관련된 용어로 부유토사(suspended sediments), 부니, 현탁물질 등으로 통용된다. 연안에서는 항만 및 연안개발사업, 산업폐수의 유입, 토사투기 등에 의하여 육상 기원의 토사가 유입되어 부유물질 농도는 상승하게 된다. 특히 하구역에 위치한 하구 댐(하굿둑)은 수문개방에 의하여 강제 방류가 일어나면서 연안에서는 부유물질의 농도가 일시적으로 상승하는 등의 급격한 환경변화가 일어난다(Moon *et al.*[1991]; Tazaki *et al.*[2002]). 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]).

연안 환경의 변화 요인 중 하나로서 부유물질에 의한 탁도의 증가는 광 투과량을 감소시켜 1차생산량에 영향을 미치는데 부유물질의 침착에 의해 부착기질이 감소되고 서식처가 파괴됨으로써 저서생물들의 생태-생리적 영향을 증가시키는 요인이 될 수 있으며, 장기적으로는 대량 폐사를 일으켜 어업 피해를 초래할 수 있다(Ohata *et al.*[2011]). 그리고 Lee *et al.*[2003]은 항만공사시 발생하는 부유토사는 표층에서 취송류, 저층에서 조류의 영향을 많이 받으며, 부유토사의 확산은 표층보다는 저층으로 더 멀리 확산된다고 주장하였다. 또한 Youn and Pyen[1992]은 제주도 연안 해역에서의 총부유성 고형 물질(TSS, Total Suspended Solids)의 농도 변화를 조사한 결과, 하천수의 유입이나 조석력과 같은 외력, 섬 지방의 강한 풍랑에 의한 침전물의 재부유에 의한 영향이 크게 미치는데, 하천수 유입량의 계절적 변동은 희석률을 크게 증감시킴으로써 총부유성 고형 물질의 농도가 여름철에 상대적으로 낮고 겨울철에는 높아지는 경향이 있다고 보고한 바 있다.

본 연구 대상해역인 부산 연안은 부산항 및 부산항 신항과 같은 대규모 항만, 낙동강 대하천, 대한해협과 인접한 열린 바다의 지정학적 위치로 인해 타 해역보다 다소 복잡하고 역동적인 해양환경 특성을 가질 수 있다. 이에 Lee *et al.*[2022]은 낙동강 등 육상 기원의 토사가 해상으로 유입되어 부유물질 농도는 상승할 것이라는 관점을 바탕으로 부산 연안의 부유물질과 투명도 실관측 자료를 바탕으로 해역 수괴를 군집분석한 결과, 부산 연안은 7개의 군집으로 구분되며 이를 바탕으로 해역 수괴를 분석할 수 있다고 보고한 바

있다. 하지만 부산 연안의 부유물질의 장기적인 변동 요인이 낙동강 대하천으로부터 유입되는 토사의 영향인가에 대한 연구 결과를 현재로서는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Lee *et al.*[2022]의 후속연구로서 Fig. 1의 해양환경정보포털(MEIS[2025])에서 제공되는 최근 15년 동안의 부산 연안 해수의 표층 및 저층의 부유물질 관측자료를 이용하여 수층간 상호 관련성, 공간적 분포를 검토함으로써 부산 연안의 해양환경 특성을 살펴보고자 하였다. 특히 낙동강으로부터 멀어짐에 따라서 해수의 부유물질 공간분포가 어떻게 변화하는지에 대한 관점에서 장기 데이터를 바탕으로 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 부유물질 및 낙동강 하천유량 자료 수집

본 연구에서는 해양수산부(MOF) 해양환경정보포털(MEIS[2025])에서 제공하는 부산 연안 12개 정점에서 관측된 해양환경측정망 데이터를 수집하였다(Fig. 1). 수집된 데이터는 표층 부유물질(Surface Suspended Solids, SFSS) 및 저층 부유물질(SeaBed Suspended Solids, SBSS), 수심(Depth)이다. Fig. 1과 Table 1은 수집된 자료의 12개 정점에 대한 위치 및 수심, 데이터 갯수를 나타내고 있다. 수집된 자료는 연도별, 관측정점별로 다소 차이가 있으나, 2009년 2월부터 2023년 11월까지 매 분기별(2, 5, 8, 11월)의 15년 동안의 총 672개 자료이다. 이중 Q6~Q8의 경우는 2013년 2월부터 총 11년 동안 관측된 자료로서 그 이전의 경우는 자료가 부재하다.

또한 낙동강으로부터 바다로 유출되는 실 관측 하천유량과 Fig. 1의 해양환경측정망 관측정점 중 부유물질 관측정점(Q12)과 상호 관련성을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 환경부(ME)의 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS[2025])에서 제공하는 2010부터 2023년까지의 하천유량 실관측 자료를 수집하였다. 관측정점은 Fig. 1의 St.R에 해당하며 이는 비정기적인 관측으로 총 66회의 현장조사 결과이다. 수집자료에는 조사 당시의 평균수위, 유속, 조사방법 등이 포함되어 있다.

2.2 부유물질 자료 해석 방법

본 연구에서는 표층 및 저층 부유물질의 15년간의 경년변동을 시계열 분석, 최대 및 최소 등의 통계값을 통한 공간 분포 차이를

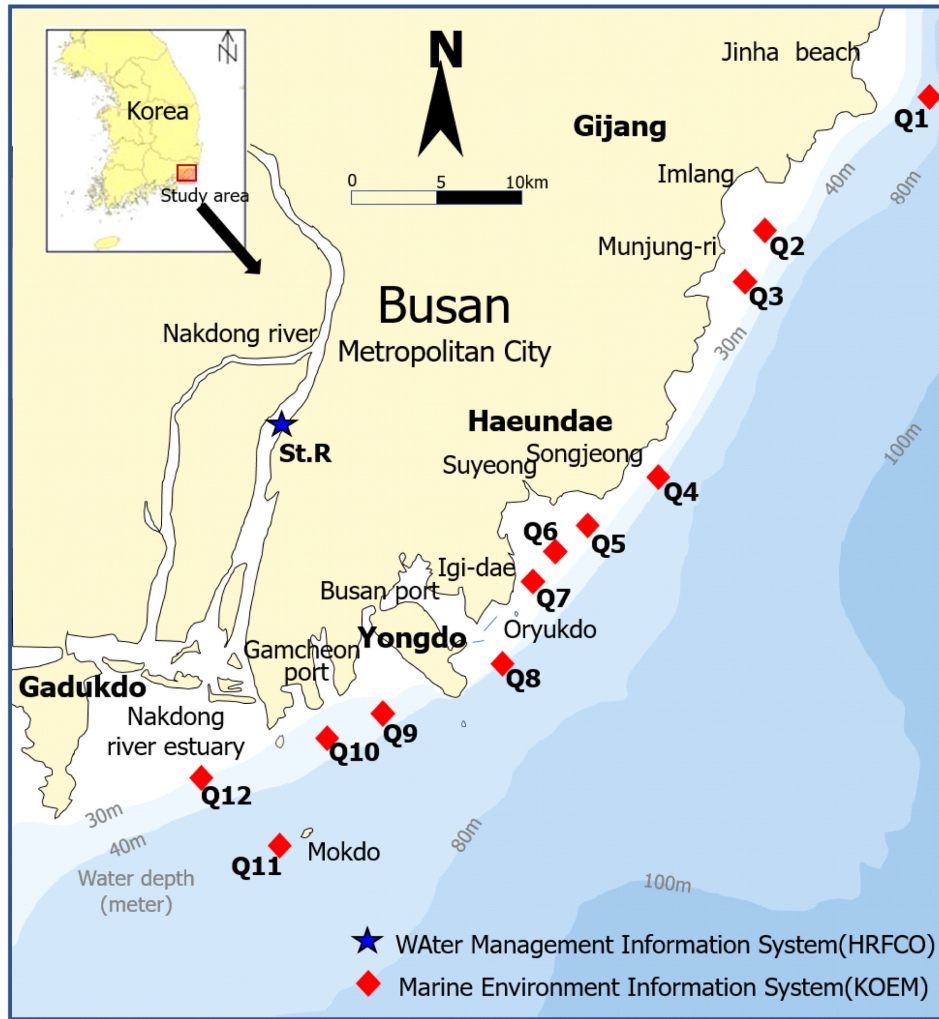


Fig. 1. Location of sampling stations of suspended solids in the Busan coast.

Table 1. Current status of sampling stations

Station	Record point※	Location	Water depth (m)	Data (EA)	Data period (mm.yy)	Remark
Q1	CK2439	35°22'03"N 129°24'28"E	69	60	Feb. 09~Nov. 23	East side of Jinha beach
Q2	CK2437	35°18'00"N 129°17'30"E	29	60	Feb. 09~Nov. 23	Southeast of Imrang beach
Q3	CK2435	35°17'00"N 129°16'49"E	30	60	Feb. 09~Nov. 23	Southeastern part of Munjung-ri
Q4	CK2436	35°10'00"N 129°13'00"E	26	60	Feb. 09~Nov. 23	In front of Songjeong beach
Q5	BK1414	35°08'50"N 129°10'10"E	20	60	Feb. 09~Nov. 23	In front of Haeundae beach
Q6	BK1430	35°08'01"N 129°09'18"E	19	44	Feb. 13~Nov. 23	South of Suyeong bay
Q7	BK1428	35°07'05"N 129°08'17"E	23	44	Feb. 13~Nov. 23	East side of Igi-dae
Q8	BK1420	35°04'20"N 129°07'14"E	38	44	Feb. 13~Nov. 23	Southwest of Oryukdo
Q9	BK1418	35°02'51"N 129°02'45"E	24	60	Feb. 09~Nov. 23	South of Yeongdo
Q10	BK1419	35°02'05"N 129°00'44"E	26	60	Feb. 09~Nov. 23	Gamcheon port entrance
Q11	CK2433	34°58'35"N 128°58'00"E	42	60	Feb. 09~Nov. 23	West of Mokdo
Q12	BK1402	35°00'46"N 128°55'38"E	25	60	Feb. 09~Nov. 23	Nakdong River Estuary

※Data source: Marine Environment Information System [2025]

살펴보고 Fig. 1에 제시된 모든 관측정점(Q1-Q12)에 대해서 저층 (x)과 표층(y)의 부유물질 관측 자료를 바탕으로 선형회귀식 및 R² (결정계수, Coefficient of determination)를 산정하였다. 결정계수

R²은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R^2 = 1 - \frac{SSF}{SST} \tag{1}$$

Table 2. Results of minimum, maximum, and average suspended solids concentrations (mg/L) and regression curves for each water layer at the survey site

Station	Min. value			Max. value			Ave. value			Regression curve eg.	r (Correlation coefficient)	R ² (Coefficient of determination)
	C _s (y)	C _b (x)	Δ	C _s (y)	C _b (x)	Δ	C _s (y)	C _b (x)	Δ			
Q1	1.6	2.9	1.3	17.4	52.2	34.8	5.3	15.9	10.6	y=0.0572x+4.2381	0.1614	0.0260
Q2	0.2	2.3	2.1	34.4	36.4	2.0	6.8	10.7	3.9	y=0.2499x+3.8707	0.3161	0.0999
Q3	1.6	3.1	1.5	17.8	37.6	19.8	6.4	11.6	5.2	y=0.0966x+5.2087	0.1972	0.0389
Q4	0.8	2.5	1.7	26.0	40.0	14.0	6.6	12.6	6.0	y=0.0765x+5.4015	0.1764	0.0311
Q5	0.8	2.5	1.7	27.8	34.0	6.2	7.2	9.3	2.1	y=0.2790x+4.4150	0.3084	0.0951
Q6	2.6	2.8	0.2	22.3	21.0	-1.3	8.6	8.9	0.3	y=0.7131x+2.1706	0.6192	0.3834
Q7	1.4	2.3	0.9	19.3	26.1	6.8	7.4	10.8	3.4	y=0.3020x+4.0009	0.4398	0.1935
Q8	1.3	3.1	1.8	13.7	43.6	29.9	6.5	13.1	6.6	y=0.1429x+4.6521	0.3456	0.1194
Q9	2.0	3.6	1.6	21.7	59.9	38.2	7.1	11.3	4.2	y=0.1988x+4.8266	0.4475	0.2003
Q10	1.1	2.8	1.7	34.9	52.0	17.1	8.5	14.4	5.9	y=0.2062x+5.3071	0.3717	0.1382
Q11	0.3	1.6	1.3	33.4	35.5	2.1	6.7	11.2	4.5	y=0.3367x+2.6810	0.3894	0.1516
Q12	1.4	2.2	0.8	31.7	35.0	3.3	9.4	13.0	3.6	y=0.6175x+1.2387	0.6767	0.4580
All data	0.2	1.6	1.4	34.9	59.9	25.0	6.97	11.65	4.68	y=0.1967x+4.6733	0.3222	0.1038

※C_s and C_b represent the suspended solid concentrations in the surface and bottom layers, respectively. And Δ = C_b - C_s.

여기서, $SST = \sum(Y_i - \bar{Y})^2$, $SST = \sum(Y_i - \hat{Y}_i)^2$ 이며, \bar{Y} 는 모든 y값의 평균, $Y_i - \bar{Y}$ 는 각 y값이 가지는 평균으로부터 떨어진 변량을, $Y_i - \hat{Y}_i$ 는 회귀식으로 설명할 수 없는 변량(일반적으로 잔차)을 의미한다. R²이 1에 가까울수록 해당 선형회귀식은 원자료를 적합하게 나타내는 것이며, 0에 가까울수록 회귀식의 의미가 약해진다고 판단할 수 있다. 즉, 선형 회귀분석에서 모델의 성능을 평가하는 지표로서 ‘독립변수(x)가 종속변수(y)를 얼마나 잘 설명하는가’를 나타낸다. 한편, R²는 상관계수(r, Correlation coefficient)의 제곱(r²)과 동일하다.

따라서 본 연구에서의 R²는 저층(x) 부유물질과 표층(y) 부유물질 사이에는 얼마만큼의 상관성이 있는지, 표층의 값이 저층의 값에 의해서 얼마나 설명될 수 있는지 그 정도를 의미한다고 할 수 있다. 즉, R²가 1이면 표층과 저층이 100% 직접적으로 상호관련이 있음을, 0이면 상호관련성이 없음을 의미한다.

한편 Table 1에 제시된 12개 정점들 중에서 정점 Q6-Q8의 경우는 자료의 개수가 부족한 점(타 정점들에 비해 약 27%(16/60)에 해당)이 있으나 앞서 식 (1)에 적용되는 입력값들이 각 관측정점의 저층(x)과 표층(y)의 부유물질 관측 자료를 적용하므로 데이터 누락이 정점별로 평균값이나 R²값 상호 비교에는 영향을 미칠 수 있겠으나 그 정도는 큰 문제가 되지 않는다고 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부유물질의 공간분포 현황

Table 2는 수집된 자료의 12개 정점에 대한 2009년 2월부터 2023년 11월까지 매 분기별(2, 5, 8, 11월)의 15년 동안의 총 672개 자료에 대한 최소값, 최대값, 평균값, 선형회귀곡선, R²(결정계수)을 산정하여 제시한 것이다.

해수 중 부유물질의 최대값은 표층의 경우 감천항 전면 해역(정점

Q10)에서 34.9 mg/L, 저층의 경우 영도 남측 해역(정점 Q9)에서 59.9 mg/L이었으며 최소값은 표층의 경우 임랑 남측 해변(정점 Q2)에서 0.2 mg/L, 저층의 경우 목도 서측 해역(정점 Q11)에서 1.6 mg/L이었다. 표층과 저층의 편차(Δ)가 가장 큰 곳은 최소값의 경우에는 정점 Q2에서 2.1 mg/L, 최대값의 경우에는 정점 Q9에서 38.2 mg/L이었다. 전체 데이터의 평균값은 표층에서 6.97 mg/L, 저층에서 11.65 mg/L이었는데 표층에서의 부유물질 농도 평균값이 가장 큰 곳은 낙동강 하구둑 전면 해역(정점 Q12)에서 9.4 mg/L, 저층에서는 진하 해변 동측 해역(정점 Q1)에서 15.9 mg/L이었다. 이는 연안의 특정 지역에서 부유물질 축적이 더욱 두드러질 수 있음을 시사한다. 그리고 표층과 저층의 편차(Δ)가 가장 큰 곳은 정점 Q1에서 10.6 mg/L, 가장 작은 곳은 수영만 전면 해역(정점 Q6)에서 0.3 mg/L이었다.

Lee et al.[2022]의 부산 연안의 부유물질 자료(2011~2020년의 10년 자료) 해석 결과에 따르면, 해수의 부유물질 농도가 가장 큰 정점은 표층에서는 낙동강 하구둑 전면 해역(78.6 mg/L), 저층의 경우 부산항 신항 내측 해역(92.6 mg/L)이었다. 이에 반해 부유물질 농도가 가장 낮은 해역은 부산 남항, 수영강 하류 및 기장군 고리원전 전면 해역에 해당하였다. 하지만 본 연구 결과에서는 다대포 및 감천항, 영도 및 남항 전면해역이 낙동강 하구역보다는 다소 부유물질 농도가 크게 나타났고 임랑 해역 및 외해에 위치한 목도 주변해역이 부유물질 농도가 낮게 나타났다. 이러한 차이는 관측 자료의 수집 기간 확장이나 대표 관측 정점의 선택 차이에서 기인할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 관측정점의 부유물질의 표층 및 저층의 경년변동을 살펴보기 위해 Fig. 2와 같이 대표적으로 4개 정점에 해당하는 진하 해변 동측 해역(정점 Q1), 수영만 전면 해역(정점 Q6), 영도 남측 해역(정점 Q9), 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에 대해서 표층과 저층의 경년변화 시계열 및 상관관계 분포도를 제시하였다. 진하 해변에 해당하는 정점 Q1의 Fig. 2(a)를

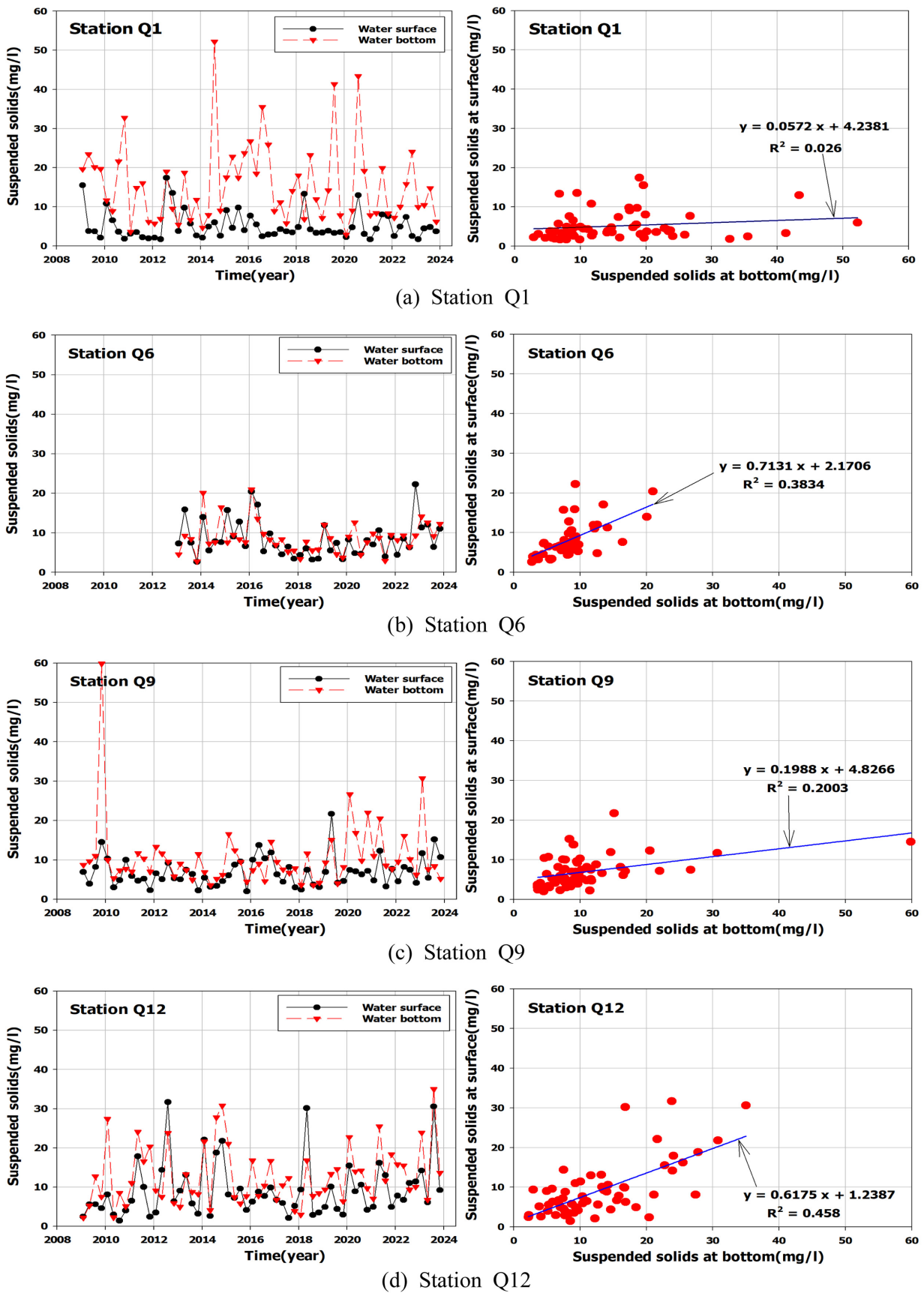


Fig. 2. Time series (left) and correlation (right) between surface and bottom of suspended solids at representative 4 survey points.

살펴보면 표층에 비해 저층에서 부유물질의 변동폭이 크다는 것을 알 수 있고 회귀곡선식은 $y = 0.0572x + 4.2381$, R^2 는 0.026이었다. 다음으로 수영만 전면해역에 해당하는 정점 Q6의 Fig. 2(b)를 살펴보면 표층과 저층에서 부유물질의 변동폭이 크지 않음을 알 수 있고 회귀곡선식은 $y = 0.7131x + 2.1706$, R^2 는 0.3834이었다. 또한 영도 남측 및 남향 전면 해역에 해당하는 정점 Q9의 Fig. 2(c)를 살펴보면 대체로 표층과 저층에서 부유물질의 변동폭이 크지 않으나 2009년 11월에 저층에서 59.9 mg/L의 최대값을 보이는데 이때 인근 감천항 전면 해역(정점 Q10)의 저층에서도 52.0 mg/L의 다소 높은 값이 확인된다. 정점 Q9에서의 회귀곡선식은 $y = 0.1988x + 4.8266$, R^2 는 0.2003이었다. 그리고 마지막으로 낙동강 하구역 전면해역에 해당하는 정점 Q12의 Fig. 2(d)를 살펴보면 표층에 비해 저층에서 부유물질의 변동이 대체적으로 30 mg/L이내에서 변동하고 있고 경우에 따라서는 저층보다 표층이 크게 나타나는 경우가 발견되는데 이는 표층수에 해당하는 하천수의 영향으로 생각된다. 즉, 하천수가 해수로 유입될 때 표층에 고농도의 부유물질을 공급하여 이러한 현상이 나타날 수 있다. 회귀곡선식은 $y = 0.6175x + 1.2387$, R^2 는 0.458이었다.

Fig. 3은 수집된 모든 자료에 대한 표층과 저층의 상관관계 분포도를 제시하였다. 그림에서 회귀곡선식은 $y = 0.1967x + 4.6733$, R^2 는 0.1038이었다. 결과적으로 수집된 자료의 12개 정점에 대한 2009년 2월부터 2023년 11월까지 매 분기별(2, 5, 8, 11월)의 15년 동안의 표층과 저층의 부유물질 농도 자료는 두 변수(표층과 저층)가 서로 크게 영향을 주고 받지 않는 것으로 해석될 수 있다. 즉, 표층 부유물질 농도가 크다고 해서 저층이 높다고 할 수 없으며 그 반대로 동일한 논리가 적용되는 것이다.

3.2 부유물질의 표층과 저층의 농도 차이

Fig. 4는 수집된 모든 자료에 대한 표층과 저층의 부유물질 농도의 그 차이 및 공간상의 분포를 살펴보고자 하였다. 그림에서 데이터는 15년간의 평균값을 나타낸 것이다.

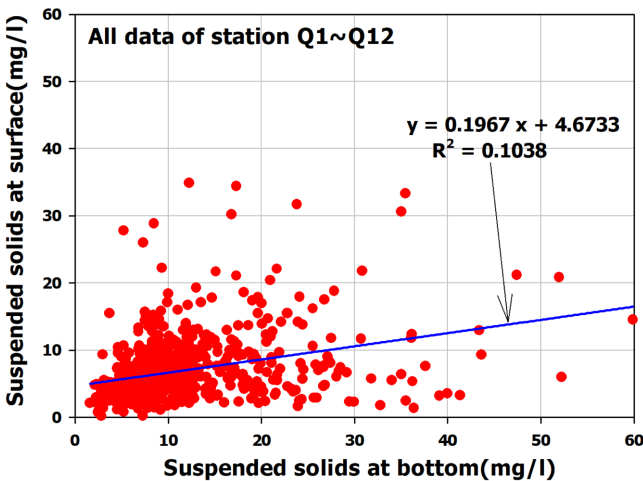


Fig. 3. Correlation analysis of suspended solids concentrations at the surface and bottom layers of all data.

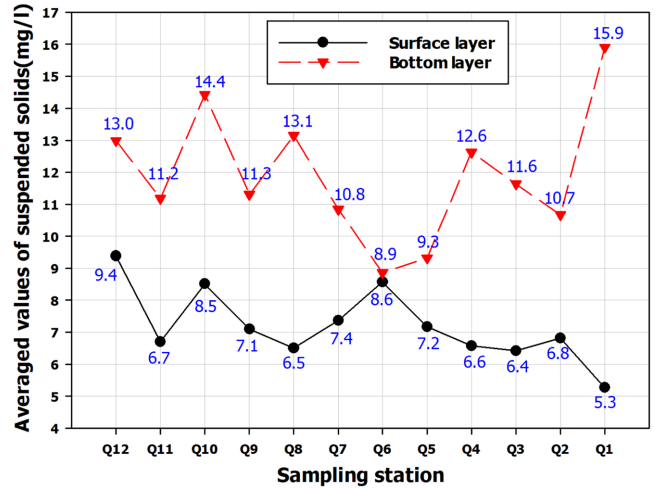


Fig. 4. Comparison of average suspended solids concentrations at surface and bottom layers by sampling points.

결과적으로 표층보다는 저층의 부유물질 농도가 크고 공간상으로 일정한 패턴을 가지는 경우도 그렇지 않은 경우도 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 영도 전면 해역(정점 Q9)에서 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)까지의 경우 표층과 저층의 변화 패턴이 동일하게 나타난다. 하지만 부산항이 위치하는 오류도 남서측 해역(정점 Q8)으로부터 동측 해역에서는 일정한 패턴을 가지지 않음을 알 수 있다. 이는 해당 지역이 낙동강의 영향권에서 벗어나 다른 해양물리적 요인에 의해 부유물질 변동이 지배될 가능성을 시사한다. 특히 수영만 인근 해역(정점 Q6)에서는 표층과 저층이 거의 유사한 값을 보이고 있고 진해 해변 동측 해역(정점 Q1)에서는 극단적으로 차이(△)가 발생하여 그 값이 10.6 mg/L에 달한다.

3.3 낙동강 하천수의 영향

낙동강 하천으로부터 유입되는 실 관측 하천유량과 낙동강 전면해역에서의 부유물질의 상호 관련성을 살펴보고자 하였다. 해양환경정책정보 자료인 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)의 부유물질의 경년변화와 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS[2025])에서 제공하는 2010년부터 2023년까지의 하천유량 실관측 자료(Table 3)를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 그렇지만 엄격히 말해 상술한 두 자료는 자료의 동시성(부유물질과 하천유량 관측 시점의 일치)에서 다소 맞지 않음을 감안하고 살펴볼 필요가 있다.

Table 3의 낙동강 하천유량 실관측 자료에서 최대값은 2011년 7월 12일에 관측된 10,292.56 m³/s이었으며 하천유량이 5,000 m³/s를 초과하는 경우는 총 5회, 1,000 m³/s를 초과하는 경우는 총 12회에 해당하였다. Fig. 5는 정점 Q12의 부유물질 농도와 하천유량 실관측 자료를 그림으로 나타낸 것인데 자료의 부족 또는 부유물질과 하천유량 관측 시점의 불일치 등으로 인해 낙동강 하구역의 표층 부유물질 농도가 하천유량에 의해 크게 변동한다고 말할 수는 없다고 판단된다. 다만 하천유량이 큰 시점 전후에서 정점 Q12의 부유물질 농도가 변동하고 있음은 확인할 수 있다.

Table 3. Annual field observation results of Nakdong River discharge

Date※	Ave. water level	River width	Cross sectional area	Velocity	River discharge	Measuring method	Date※	Ave. water level	River width	Cross sectional area	Velocity	River discharge	Measuring method
year mm-dd	m	m	m ²	m/s	m ³ /s		year mm-dd	m	m	m ²	m/s	m ³ /s	
2010 08-18	2.86	483.72	3,735.84	1.34	5,104.30	Floater	2017 08-28	2.23	480.42	4,448.53	0.05	217.51	ADCP
04-26	2.29	474.49	3,792.90	0.03	102.99	ADVM	09-12	2.26	483.86	4,227.32	0.25	1,054.65	ADCP
07-12	4.04	349.50	5,118.04	2.01	10,292.56	Floater	04-11	2.29	491.09	4,498.93	0.13	599.74	ADCP
2011 07-13	2.94	326.52	4,372.06	1.46	6,384.31	Floater	07-02	2.21	497.21	4,088.27	0.92	3,768.53	ADCP
07-21	2.29	465.60	3,997.70	0.05	204.08	ADVM	08-07	2.32	486.56	4,191.25	0	7.40	ADCP
09-23	2.25	485.70	4,120.20	0.07	298.32	ADVM	08-08	2.30	486.81	4,309.97	0.03	117.82	ADCP
2012 04-05	2.17	479.31	3,880.60	0.2	769.99	ADVM	10-06	3.74	821.68	4,819.11	1.85	8,936.70	Floater
06-27	2.32	483.16	4,247.21	0.03	112.08	ADVM	10-07	3.42	558.02	4,619.83	1.62	7,481.67	Floater
2013 03-13	2.19	491.49	4,213.55	0.03	114.72	ADVM	01-17	2.40	493.41	4,412.46	0.01	38.53	ADCP
09-11	2.32	486.71	4,633.68	0	-17.10	ADVM	03-27	2.35	485.84	4,424.30	0.01	32.93	ADCP
11-20	2.19	481.31	3,997.87	0.01	21.99	ADVM	04-18	2.37	494.42	4,576.74	0.02	89.44	ADCP
2014 03-10	2.30	484.98	4,721.80	0.01	35.81	ADVM	05-28	2.30	485.74	4,159.37	0	18.58	ADCP
04-08	2.29	482.56	4,657.64	0.01	38.08	ADVM	07-11	2.35	490.28	4,451.13	0.01	43.23	ADCP
05-19	2.31	473.33	4,697.05	0.04	170.28	ADVM	07-23	2.35	478.56	4,266.17	0.30	1,273.92	ADCP
07-23	2.31	491.85	4,380.63	0.03	152.68	ADVM	08-22	2.49	476.99	4,327.80	0.22	971.97	ADCP
08-27	1.90	488.60	4,069.40	0.87	3,540.84	ADVM	09-19	2.38	487.57	4,135.84	0.06	231.29	ADCP
10-07	2.31	485.06	4,131.63	0.05	222.56	ADVM	10-23	2.35	483.16	4,182.96	0.03	133.36	ADCP
2015 03-17	2.31	494.69	4,610.99	0.03	126.42	ADCP	03-23	2.39	491.91	4,696.04	0.01	66.94	ADCP
05-28	2.22	489.47	4,147.82	0.01	51.57	ADCP	05-25	2.39	483.06	4,272.58	0.06	276.52	ADCP
06-16	2.17	480.77	4,039.75	0.08	320.17	ADCP	07-28	2.33	486.08	4,191.04	0.04	188.19	ADCP
10-07	2.25	490.06	4,307.96	0	5.20	ADCP	10-26	2.34	484.27	4,396.47	0.02	94.44	ADCP
2016 03-16	2.29	478.91	4,408.72	0.02	70.24	ADCP	11-04	2.30	486.93	4,362.31	0.03	112.09	ADCP
06-28	2.25	487.73	4,184.13	0.03	141.03	ADCP	11-11	2.37	486.05	4,520.02	0.01	44.47	ADCP
07-20	2.25	496.85	4,212.62	0.11	468.33	ADCP	03-23	2.30	489.73	4,371.55	0.01	37.30	ADCP
08-23	2.28	486.78	3,981.96	0	1.84	ADCP	05-11	2.34	485.77	4,327.70	0.02	67.04	ADCP
11-10	2.23	489.86	4,296.23	0.03	143.47	ADCP	2022 08-18	2.22	478.67	4,404.05	0.21	943.72	ADCP
2017 03-15	2.28	484.83	4,237.55	0	13.72	ADCP	10-25	2.40	485.03	4,395.33	0	8.58	ADCP
04-11	2.14	480.60	3,981.96	0.07	262.20	ADCP	12-08	2.40	486.79	4,439.18	0.01	29.39	ADCP
05-17	2.17	490.69	4,134.45	0.12	496.70	ADCP	03-30	2.41	483.88	4,422.58	0.01	26.61	ADCP
06-20	2.25	490.24	4,240.81	0	6.73	ADCP	06-21	2.25	482.29	4,074.63	0.04	146.30	ADCP
07-04	2.16	489.68	4,192.36	0.36	1,497.98	ADCP	2023 08-16	2.18	482.80	3,838.40	0.01	55.33	ADCP
08-16	2.24	484.69	4,194.59	0.35	1,471.02	ADCP	08-17	2.37	486.56	3,943.88	0.22	875.03	ADCP
08-17	2.00	485.14	4,046.29	0.33	1,323.43	ADCP	11-15	2.28	479.42	4,152.77	0	20.67	ADCP

※Year of cited literature from Annual Hydrological Report on Korea of Ministry of Environment(ME)

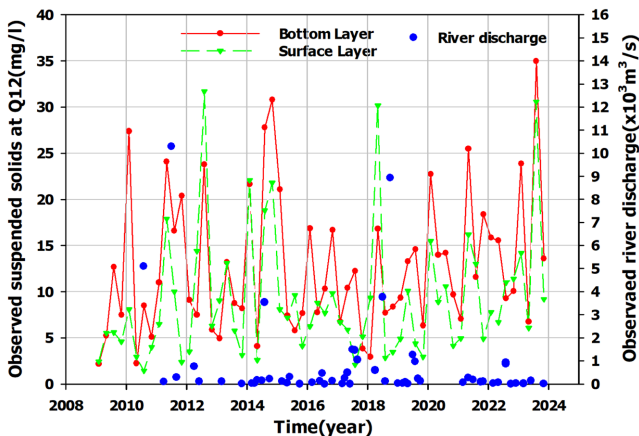


Fig. 5. Comparison of surface/bottom layer suspended solids concentrations at survey site Q12 with Nakdong River discharge.

3.4 관측정점 선형회귀식 선정

앞서 Table 2에 제시된 부유물질 관측정점들에 대하여 선형회귀식을 산정하였다. 즉, R^2 (결정계수)의 값들이 관측정점별로, 낙동강으로부터 멀어짐에 따라서 어떻게 변화하는지에 대한 관점에서 수집 데이터에 기반해서 분석하였다.

먼저 12개 관측정점에서 R^2 가 가장 큰 정점은 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에서 0.458이며 다음으로 수영만 전면 해역(정점 Q6)이 0.3834이었다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림에서 낙동강 하구역에서부터 가장 연안으로 진행하면서 점차적으로 R^2 이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 총 12개 정점에 대해서 R^2 에 대한 선형회귀식을 살펴보면 $y = -0.0233x + 0.3123$ 이었다. 즉, 낙동강으로부터 공간상으로 멀어짐에 따라서 관측정점의 표층과 저층의 상호 관련성이 감소하고 있음을 의미하고 있다. 특히 낙동

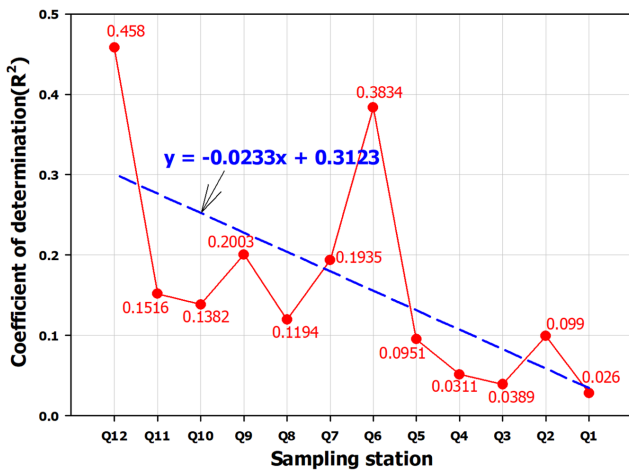


Fig. 6. Spatial distribution of coefficient of determination (R^2) by survey station.

강 하구역(정점 Q12)과 수영강 전면 해역(정점 Q6)에서 R^2 의 값이 다른 정점들에 비해 크게 나타나고 있는데, 정점 Q6의 경우에는 수영강의 영향을 지배적으로 받기 때문인 것으로 사료된다. 이들 두 정점을 제외하면 나머지 관측정점들(10개 정점)의 R^2 에 대한 선형회귀식을 살펴보면 $y = -0.014x + 0.2076$ 에 해당하였다. 앞서 총 12개 정점에 비해 다소 감소하는 기울기는 완만하지만 전반적으로 감소하는 경향은 살펴볼 수 있다.

3.5 부유물질 장기 변동 및 공간분포

부산 연안 해수의 부유물질 관측정점 12개소의 표층 및 저층의 부유물질 관측자료를 이용하여 수층간 상호 관련성, 공간적 분포를 검토하였다. 그 결과, 표층과 저층의 부유물질이 동일 시점에서 변동하는 구역은 낙동강 하구역 전면해역(정점 Q12)에서 영도 전면해역(정점 Q9)까지로 판단된다. 나머지 구역에서는 표층과 저층의 부유물질 농도가 크게 상관성을 보이면서 변동하는 것으로 보이지 않는다. 또한 표층과 저층의 부유물질의 선형회귀식을 바탕으로 낙동강으로부터 멀어짐에 따라서 해수의 부유물질 공간분포가 어떻게 변화하는지에 대해서 살펴본 결과, 낙동강으로부터 공간상으로 멀어짐에 따라서 관측정점의 표층과 저층의 상호 관련성이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 정량적인 평가에는 한계가 있으나 정성적인 관점에서 낙동강 하천수에 의한 부유물질은 부산 연안 해수에 영도 서측 해역까지의 일정 구역까지만 영향을 주고 있으며 그 외 영도 동측 해역부터는 낙동강 하천수보다 다른 해양물리 환경 요인(예: 항만 개발, 산업 폐수, 준설, 선박 운항, 파랑 등)에 의해 부유물질 농도 변동이 더 크게 영향을 받는 것으로 추정된다. 이는 부산 연안의 해역별 특성을 이해하고 해역 관리 전략을 수립하는 데 중요한 기반이 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 부산 연안 해수의 표층 및 저층의 부유물질 관측

자료를 이용하여 수층간 상호 관련성, 공간적 분포를 검토함으로써 낙동강으로부터 거리에 따라서 해수의 부유물질 공간분포가 어떻게 변화하는지에 대해서 살펴보고자 하였다. 자료는 해양수산부 해양환경측정망의 15년간(2009년 2월부터 2023년 11월) 총 672개에 달하는 관측자료를 활용하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 부산 연안 부유물질에 대한 전체 데이터의 평균 농도는 표층에서 6.97 mg/L, 저층에서 11.65 mg/L로, 저층의 부유물질 농도가 표층보다 높게 나타나는 일반적인 경향을 확인하였다. 이는 Lee *et al.*[2003]이 주장한 바와 같이 부유토사의 확산이 표층보다는 저층으로 더 멀리 확산될 수 있다는 관점과도 연결될 수 있다. 가장 높은 평균 농도는 표층의 경우 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에서 9.4 mg/L, 저층의 경우 진해 해면 전면 해역(정점 Q1)에서 15.9 mg/L로 나타났다. 이는 연안의 특정 지역에서 부유물질 축적이 더욱 두드러질 수 있음을 시사한다. 이전 연구(Lee *et al.*[2022])에서는 낙동강 하구역 전면 해역과 부산항 신항 내측 해역에서 더 높은 농도로 보고된 바 있으나, 본 연구에서는 다대포, 감천항, 영도 및 남항 전면 해역이 낙동강 하구역보다 다소 높은 농도를, 임랑 해역 및 외해의 목도 주변 해역이 낮은 농도를 보였다. 이러한 차이는 관측 자료의 수집 기간의 확장이나 대표 관측 정점의 선택의 차이에서 기인할 수 있다.

2) 낙동강 하구역에서의 표층과 저층 부유물질 간의 상관성과 하천수의 영향을 파악한 결과에 따르면, 관측 정점 중 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에서 표층과 저층 부유물질 간의 상관성이 가장 높게 나타났으며, 이때 결정계수(R^2) 값은 0.458이었다. 결정계수는 독립변수(저층 부유물질)가 종속변수(표층 부유물질)를 얼마나 잘 설명하는지를 나타내는 지표로, 1에 가까울수록 강한 상관성을 의미한다. 즉, 정점 Q12에서는 저층 부유물질 변동의 약 45.8%가 표층 부유물질 변동과 관련이 있다고 해석할 수 있다. 이 지역의 선형회귀식은 $y = 0.6175x + 1.2387$ 로 도출되었다. 특히, 정점 Q12에서는 저층보다 표층에서 부유물질 농도가 크게 나타나는 경우가 관찰되었는데, 이는 낙동강 하천수에 의한 직접적인 영향으로 판단된다. 하천수가 해수로 유입될 때 표층에 고농도의 부유물질을 공급하여 이러한 현상이 나타날 수 있다.

3) 표층과 저층 부유물질 변동의 공간적 일치성 범위에 대해서는 표층과 저층의 부유물질 농도가 동일한 시점에서 유사하게 변동하는 구역은 낙동강 하구역 전면 해역(정점 Q12)에서 영도 전면 해역(정점 Q9)까지로 확인되었다. 이는 낙동강 하천수의 영향이 영도 서측 해역까지 비교적 강하게 미치고 있음을 의미한다. 그러나 부산항이 위치한 오륙도 남서측 해역(정점 Q8)부터 동측 해역에서는 표층과 저층 부유물질 농도 간에 뚜렷한 상관성이 관찰되지 않았다. 이는 해당 지역이 낙동강의 영향권에서 벗어나 다른 해양물리적 요인에 의해 부유물질 변동이 지배될 가능성을 시사한다. 특히 수영만 인근 해역(정점 Q6)에서는 표층과 저층의 농도 차이가 0.3 mg/L로 가장 작게 나타났으며, 결정계수(R^2)도 0.3834로 비교적 높게 나타났는데, 이는 수영강의 영향을 지배적으로 받기 때문인 것으로 분

석된다.

4) 낙동강으로부터 거리에 따른 부유물질 상호 관련성 변화에 대하여 선형회귀식의 결정계수(R^2) 값을 분석한 결과, 낙동강으로부터 공간적으로 멀어질수록 관측점점의 표층과 저층 부유물질 간의 상호 관련성이 감소하는 경향을 명확히 확인할 수 있었다. 이는 낙동강 하천수가 가지는 부유물질 유입 영향이 연안을 따라 확산되면서 점차 희석되거나 다른 환경 요인에 의해 상쇄되기 때문일 것이다. 총 12개 정점에 대한 결정계수(R^2)의 공간 분포를 선형 회귀 분석한 결과, $y = -0.0233x + 0.3123$ 의 회귀식이 도출되었으며, 이는 거리가 멀어질수록 상관성이 줄어드는 경향을 정량적으로 보여준다.

5) 낙동강 하천수 영향의 공간적 범위를 추정하는데 있어 분석 결과를 종합하면 낙동강 하천수에 의한 부유물질은 부산 연안 해수 중 영도 서측 해역까지의 특정 구역에만 영향을 주고 있으며, 그 외 영도 동측 해역부터는 낙동강 하천수보다 다른 해양물리적 환경 요인(예: 항만 개발, 산업 폐수, 준설, 선박 운항, 파랑 등)에 의해 부유물질 농도 변동이 더 크게 영향을 받는 것으로 추정된다. 이는 부산 연안의 해역별 특성을 이해하고 해역 관리 전략을 수립하는데 중요한 기반이 될 것으로 판단된다.

본 연구는 이러한 정성적인 분석을 통해 낙동강 하천수가 부산 연안의 부유물질 분포에 미치는 공간적 한계를 제시했으나, 일부 관측 정점만을 바탕으로 한 해석과 결정계수의 유의미성, 해양 파랑 내습에 대한 검토 부재 등은 향후 추가 연구를 통해 보완되어야 할 부분으로 사료된다.

후 기

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 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. Environ. Eng.*, 6(2), 38-45.
- [2] 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.
- [3] Lee, S.H., Jang, S.C. and Yoon, H.S., 2022, Spatial distribution characteristics of transparency and suspended solids in Busan coastal waters, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 25(4), 171-182.
- [4] Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2025, Marine Environment Information System (MEIS), <https://www.meis.go.kr/portal/main.do> (Accessed 2025.04.23.)
- [5] Ministry of Environment (ME), 2025, WAter resources Management Information System (WAMIS), https://www.wamis.go.kr/wkw/wkw_flwsrrs_1st.do (Accessed 2025.04.25.)
- [6] Moon, M.H., Cho, J.W. and Lee, M.C., 1991, A variation on the marine environments in the Yeongsan river estuary, *Natural Science Research*, 14, 101-115.
- [7] 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, *Fisheries Science*, 77, 207-215.
- [8] Tazaki, K., Nawatani, N., Kunimine, Y., Morikawa, T., Nagura, T., Warimoto, R., Asada, R., Watanabe, H., Nagai, K., Ikeda, Y., Sato, K., Segawa, H. and Miyata, K., 2002, Sediment characteristics of dasidaira dam reservoir of Kurobe river and Toyama bay and flushed suspension impacts on fishes. *J. Geol. Soc. Japan*, 108, 435-452.
- [9] Youn, J. and Pyen, C.K., 1992, Characteristics of Variation of Suspended Matters in the Cheju Coastal Area of Korea, *Journal of aquaculture*, 5(1), 93-108.

Received 22 September 2025

Revised 9 December 2025

Accepted 22 December 2025