

한강하구 육상기인 오염물질이 인천연안 해역에 미치는 영향

신문기[†], 이해민¹⁾, 김교영, 유희중, 윤병일¹⁾, 김종욱¹⁾, 송진일¹⁾, 우승범¹⁾, 최상인, 권문주
인천보건환경연구원 해양조사과, ¹⁾인하대학교 해양과학과

The Impact of Land-Based Pollutant from the Han River Estuary on the Coastal Waters of Incheon

Moon-Khee Shin[†], Hye-Min Lee¹⁾, Kyo-Young Kim, Hee-Jong Yoo, Byung-Il Yoon¹⁾,
Jong-Wook Kim¹⁾, Jin-Il Song¹⁾, Seung-Buhm Woo¹⁾, Sang-In Choi, Mun-Ju Kwon

Division of Marine Research, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

¹⁾Department of Ocean Sciences, Inha University

Abstract

We investigated the impact of land-based pollutants, including the Total Maximum Daily Load(TMDL) for water quality pollution in the Han River basin, on the coastal waters of the Incheon region. Also, modeling of the dispersion of pollutants using an ocean circulation model was simulated for the movement and diffusion of water quality pollutants.

From 2018 to 2022, the total nitrogen pollutant load in the Han River estuary has shown a pollution contribution distribution of 79.3 % from the Han River basin, 16.6 % from the Imjin River basin, and 4.1 % from the Incheon basin, respectively. Over the past 10 years (2013 - 2022), an analysis of the spatiotemporal trends in the Incheon coastal waters(34 sampling points) using seasonal Mann-Kendall tests revealed a decreasing trend in six water quality pollutants such as DIP, Chlorophyll-a, bottom layer oxygen saturation, TOC, TN, and TP. In particular, statistically significant improvements for the ecological-based seawater quality index(WQI) were observed at both 10 points influenced of Seokmo channel and 5 points influenced of the Yeomha channel, respectively. Furthermore, the simulation of salinity dispersion in the Han River estuary, using an ocean circulation model, revealed intriguing dynamics. During the maximum ebb tide, the freshwater from the Han River and Imjin River influenced the area up to Incheon Bridge and Palmi Island through the Yeomha channel. On the other hand, the Yesong River was found to affect on the southern region of Seokmo Island and the north side of Yeongjong Island through the Seokmo channel.

Key words : land-based pollutants, Han River Estuary, seasonal Mann-Kendall test, FVCOM model

I. 서론

인천연안은 한강하구의 담수와 해수가 만나는 기수역으로 다양한 생물종의 서식처이며, 수도권에서 배출한 오염물질을 자연정화하는 바다의 콩팥 역할을 하고 있다. 그러나 한강 및 임진강 등의 유역에서 인간의 활동으로 발생하는 생활하수, 산업폐수 및 쓰레기 등의 육상기인 오염물질은 해양생물종의 서식처를 훼손하고 연안 해양생태계 건강성을 지속적으로 해치고 있다. 인간활동에 의해 배출된 질소와 인 등의 영양염류는 조류의 이상증식을 초래해 적조(red tide)현상을 일으키고, 중금속, 미세플라스틱 및 잔류성유기오염물질(POPs)은 자연환경에서 분해되지 않고 먹이사슬을 통해 다시 식탁에 올라와 사람의 건강을 위협하고 있다.

해양오염 주요오염원의 약 80 %는 육지에서 발생(UNEP, 2023)되며 해류확산에 의해 인접 국가에 영향을 미친다. 이러한 이유로 해양환경 오염원의 체계적인 관리와 효과적 대응을 위한 국가간의 협력은 필수적이다. 유엔환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme)이 1995년 워싱턴 DC에서 108개 정부와 유럽연합 집행위원회와 함께 “육상기반 활동으로부터 해양환경보호를 위한 글로벌 행동 프로그램(GPA, Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities)”을 채택하면서 국가간 협력체제가 구축되었다. GPA는 9가지 주요 육상기반활동 오염원(하수/폐수, 서식지의 물리적 변화 및 파괴, 영양염류, 퇴적물 이동, 잔류성 유기오염물질, 탄화수소 등의 기름류, 쓰레기, 중금속 및 방사성 물질)의 영향을 줄이기 위한 기본정책방향을 제시하고 있다.

우리나라는 2008년 연안오염총량관리제 실시로 체계적이고 과학적인 육상기인오염원 관

리를 시작하였으며, 이후 연안 환경기초시설 확충 및 방류수 수질강화, 특별관리해역 내 비점오염원 관리지역 지정 등 육상기인 오염물질의 해양유입을 저감하기 위해 노력하고 있다.

한편 인천광역시도 한강수계 최초로 2015년 수질오염총량관리제를 시행하고 오염물질의 배출총량을 관리하고 있으며, 인천연안 유입 오염원 조사, 한강하구 환경기초조사, 송기천 등 11개 지점 하천수질측정망 운영, 폐수 배출업소 단속강화 및 쓰레기 해양유입 사전 관리 강화 등 다양한 사업을 통해 인간의 육상기반 활동으로부터 해양환경을 개선하기 위해 노력하고 있다

이에 본 연구는 한강유역 수질오염총량제 등 육상기인 오염물질 저감노력이 인천연안 수질개선에 미치는 영향을 파악하고자 하였으며, 이를 위해 한강 등 유입하천 유달부하량 산정, 인천연안 해수질의 시공간적 경향 평가, 해양순환모델을 활용한 해류이동 및 한강하구 수질오염물질의 확산을 모의하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 수질자료 및 평가방법

Table 1. Information on water quality monitoring stations.

Category	Station	Latitude	Longitude
Han River	Paldang (PD)	37.5416	127.2431
	Guui (GU)	37.5399	127.1158
	Noryangjin (NR)	37.5150	126.9608
	Haengju (HJ)	37.5983	126.8150
Imjin River	Imjingang6 (IJ)	37.9029	126.8241
	Munsancheon4 (MS)	37.8557	126.7783
	Gongneungcheon5 (GN)	37.7542	126.7364
Incheon	Gulpocheon4 (GP)	37.5723	126.7749
	Najinpochon (NJ)	37.6206	126.6868
	Geyangcheon (GY)	37.5904	126.7264

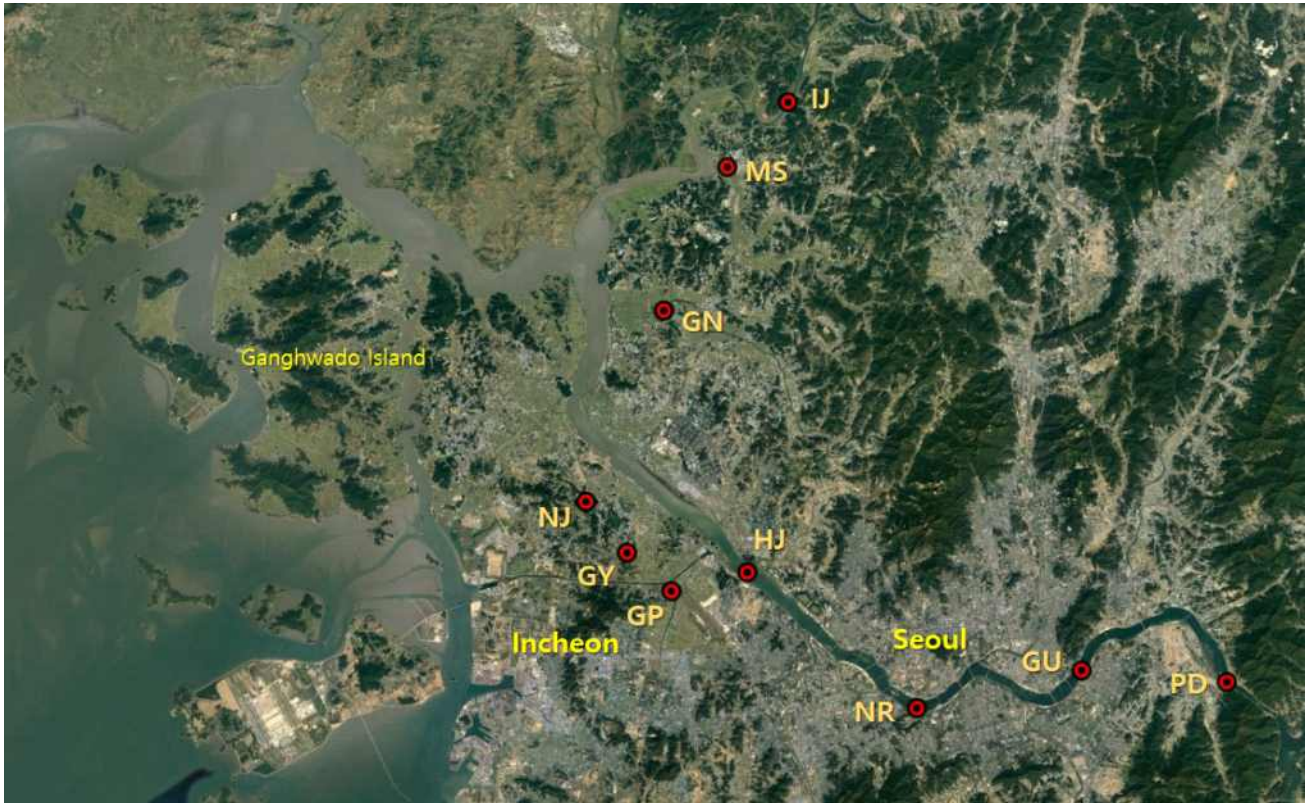


Fig. 1. The map shows the locations of the river water quality monitoring network for investigating the Pollutant Delivery Load in the Han River estuary.

인천연안으로 유입되는 육상기인 수질오염 물질의 유달부하량을 산정하기 위해 환경부 물환경정보시스템(water.nier.go.kr) 하천수질 측정망 자료를 이용하였다. 조사대상은 한강 하구에 영향을 미치는 한강, 임진강 및 굴포천 등 7개 하천으로 구성되며 서울을 가로지르는 한강권역, 경기도 임진강, 문산천 등의 임진강 권역과 굴포천, 나진포천 등의 인천권역으로 구분하였으며 자세한 조사지점 정보는 (Table 1) 및 (Fig. 1)과 같다. 각 조사 지점별 최근 5년(2018년 ~ 2022년) 기간의 수질(유기물, 영양염류 등 7종) 및 유량의 연평균 및 월평균자료를 이용하여 수질현황과 각 하천의 수질오염물질 유달부하량을 산정하였다. 또한 한강 행주 지점의 10년(2013년 ~ 2022년)간의 월평균 유달부하량을 이용하여 계절 맨켄달 통계기법(Seasonal Mann-Kendall Test)으로 오염부하분석을 실시하고, LOWESS (LOcally

WEighted Scatter Plot Smoother) 경향분석법을 활용하여 연도별 추이를 시각화하였다.

인천보건환경연구원에서는 강화연안 및 인천연안 총 34정점에 대하여 매분기별 해양수질조사를 실시하고 있다. 2013년 ~ 2022년(10년) 기간 생태기반 해수수질 기준(WQI) 지수 및 수질항목 9종(Table 2)의 분기별 수질자료를 이용하여 시공간적 수질경향을 평가하였다. 대상 지점의 구체적인 정보는 (Table 3) 및 (Fig. 2)와 같다. 평가방법은 계절 맨켄달 테스트와 LOWESS 경향분석법을 활용하였다.

Table 2. Analysis items for spatial and temporal water quality assessment of Incheon coastal.

Analysis items(10)
WQI, COD, TOC, TN, TP, DIN, DIP, Chlorophyll-a, Transparency (TR), Dissolved Oxygen in the bottom layer (DOb)

Table 3. Information on marine water quality monitoring stations in the Incheon.

NO.	Station name	Latitude	Longitude	NO.	Station name	Latitude	Longitude
S-1	Incheon Port Dock Front	37° 28' 03"	126° 35' 45"	S-18	Yeongheungdo South	37° 12' 59"	126° 25' 57"
S-2	Yeongjong Island East	37° 29' 11"	126° 34' 59"	S-19	Ganghwa Island Sunsu Ferry Terminal Front	37° 38' 20"	126° 22' 50"
S-3	Incheon Port Cruise Terminal West	37° 25' 35"	126° 35' 05"	S-20	Ganghwa Gyodongdo Namsanpo Front	37° 45' 45"	126° 17' 30"
S-4	Oido West	37° 20' 39"	126° 40' 12"	S-21	Ganghwa Jumundo Ferry Terminal Front	37° 39' 18"	126° 14' 15"
S-5	Saeodo Southeast	37° 33' 60"	126° 34' 20"	S-22	Ganghwa Changhuri Front Sea	37° 44' 46"	126° 20' 47"
S-6	LNG Terminal North	37° 23' 14"	126° 33' 50"	S-23	Ganghwa Oeopori Front Sea	37° 41' 10"	126° 23' 00"
S-7	Yeongheungdo Northwest	37° 17' 12"	126° 24' 49"	S-24	Ganghwa Chojiri Front Sea	37° 36' 59"	126° 32' 41"
S-8	Geungari Island West	37° 19' 08"	126° 34' 49"	S-25	Unyeomdo Northeast	37° 33' 09"	126° 35' 04"
S-9	Daebudo North	37° 19' 16"	126° 32' 05"	S-26	LNG Terminal West	37° 20' 56"	126° 33' 47"
S-10	Yeongheungdo North	37° 20' 00"	126° 29' 60"	S-27	Ganghwa Jangbongdo Northwest	37° 35' 00"	126° 16' 44"
S-11	Deokjeokdo North (2)	37° 18' 20"	126° 09' 49"	S-28	Deokjeokdo West	37° 15' 26"	126° 03' 55"
S-12	Muuido East	37° 24' 03"	126° 28' 02"	S-29	Deokjeokdo North (1)	37° 16' 22"	126° 09' 04"
S-13	Deokjeokdo North (3)	37° 23' 51"	126° 09' 16"	S-30	Mungapdo East	37° 09' 59"	126° 07' 39"
S-14	Wangsan Marina Port West	37° 26' 56"	126° 17' 53"	S-31	Ganghwa Seokmodo West	37° 42' 20"	126° 15' 35"
S-15	Ganghwa Jumun Island Southwest	37° 35' 10"	126° 09' 20"	S-32	Jangbongdo Southeast	37° 30' 14"	126° 24' 10"
S-16	Ganghwa Seokmodo Southwest	37° 39' 10"	126° 17' 15"	S-33	Mungapdo West	37° 11' 07"	126° 02' 46"
S-17	Manseok Pier Front	37° 29' 37"	126° 37' 21"	S-34	Yeongheungdo West	37° 16' 03"	126° 25' 47"

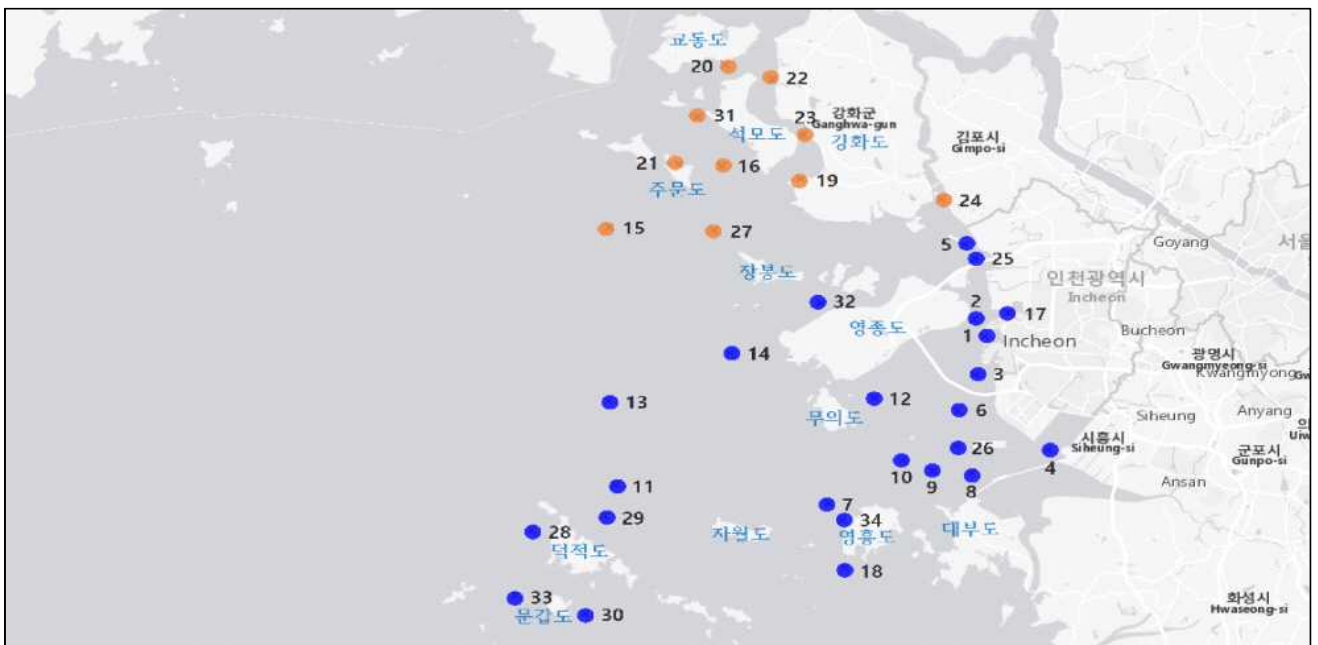


Fig. 2. The map shows the locations of the marine water quality monitoring network for investigating spatial and temporal trends in Incheon coastal area.

2.2 해양순환모델을 활용한 해류이동 및 오염물질 확산패턴 분석

2.2.1 모델개요

본 연구에 사용된 FVCOM은 Chen et al. (2003)이 개발한 비정형 그리드, 유한 체적, 3D 기본 방정식 및 자유 표면 조건의 연안해양 순환 모델이다. 지배 방정식은 수직 와류 점도에 대한 Mellor 및 Yamada level 2.5 난류 해법(Mellor and Yamada, 1982)과 수평 확산 계수에 대한 Smagorinsky 와류 매개 변수화(Smagorinsky, 1963)를 기본으로 개발되었으며, 일반 해양 난류 모델(General Ocean Turbulence Model, GOTM) 모듈의 대안으로 선택하여 사용되어 왔다(Burchard, 2002 ; Choi et al., 2021). 또한, FVCOM은 매사추세츠 다트머스 대학 및 우즈 홀 해양 연구팀에 의해 지속적으로 개선되고 있는 모델이다(Chen et al., 2004, 2006a, 2006b, 2007; Cowles, 2008 ; Choi et al., 2021). 예를 들어, 지속적인 업데이트를 통해 FVCOM 버전들은 공간적으로 가변적인 수직 분포를 갖는 일반화된 지형추적 좌표계로 개선되었고(Pietrzak et al., 2002), 극지환경, 해양구조물에 의한 해수 유동 모듈(Ge et al., 2012) 등 다양한 모듈이 개발되어 오고 있다. FVCOM에 대한 자세한 설명은 FVCOM 사용자 매뉴얼(Chen et al., 2006a)과 대표 소개 논문(Chen et al., 2006b)에 상세히 기술되어 있다(Choi et al., 2021).

2.2.2 모델수립

경기만 인천연안에 적용한 수치모델의 격자는 해역의 지형과 외력의 특성을 반영한 비구조 삼각형 격자체계를 구성하였다. 전체 격자의 동-서 방향의 길이는 약 150 km, 남-북 방향의 길이는 약 145 km로 외해 방향으로 웅진반도와 태안반도를 잇는 호를 개방경계로 하였다. 외해에서는 약 5 km의 넓은 면적을

가지는 요소로 구성하여 계산 효율성을 증가시키고자 하였으며, 연안으로 갈수록 급격히 변화하는 수심과 해안선 재현을 위해 격자의 해상도를 높여 구성하였다(Fig. 3).

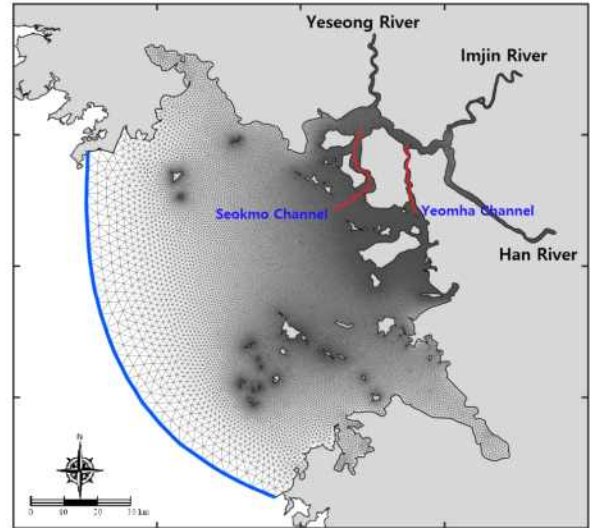


Fig. 3. Model domain applied to Gyeonggi-Bay

외해 개방경계의 조화상수 입력 자료는 오리건 주립 대학교에서 개발된 TPX08-atlas 2000 모델 자료를 Tidal Model Driver toolbox(TMD)를 사용하여 조화상수를 추출하였다. 추출한 조화상수 중 5개 주요 조석 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2)에 대한 조화상수를 외해 개방경계에 선형 내삽 방법을 사용하여 입력하였다. 보정 과정에서 8개의 조위 검조소 진폭과 위상을 보정하여 재현하였다. 국립수산과학원에서 제공하는 정선 해양 관측 자료의 최근 10년간(2010년 ~ 2019년) 수온, 염분 자료를 이용하여 연 평균된 자료를 입력하였다.

육상으로부터의 담수 공급원에 대한 입력 자료를 구성하기 위하여, 국가수자원관리종합정보시스템(Water resource Management Information System, WAMIS)으로부터 2020년 1월 20일부터 9월 20일까지 1일 간격의 실시간 한강대교와 비룡대교의 일 유량자료를 수집하였다. 수집된 유량자료를 기본으로 수치모델의 한강, 예성강 및 임진강으로부터의 0 psu의 담수를 입력하였다. 북방한계선을 넘

어선 지역에 위치한 예성강의 유량자료를 확보할 수 없기 때문에 한강대교 유량의 15%를 계산하여 예성강의 유량으로 입력하였다 (Park et al., 2002).

대기 입력 자료는 기상청 국지 예보 모델인 LDAPS로부터 U10, V10, 대기압 자료를 받아 입력하였다. 모델 모의기간에 맞추어 동계는 2월 15일부터 3월 30일 기간을 사용하고, 하계는 8월 17일부터 9월 30일 기간을 사용하였다. 해당 모델의 공간 해상도는 1.5 km이며, 연직으로 약 40 km까지 70층으로 구성되며, 3시간 간격으로 전 지구 모델로부터 경계장을 제공받아 1일 8회(00, 06, 12, 18 UTC : 36시간 예측, 03, 09, 15, 21 UTC: 3시간 예측)를 수행하였다.

2.3 관측자료 경향성 분석

수질 경향을 분석하는데 많이 활용되는 방법은 계절 맨-켄달 검정법(Seasonal Mann-Kendall Test)과 LOWESS(LOcally WEighted Scatter plot Smoother)이다. 계절 맨-켄달 검정법은 결측치가 많고 계절성이 분명한 자료에 적합하고 경향 분석의 결과를 정량적으로 평가할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 선형 경향을 기본 가정으로 하기 때문에 연구 대상 기간 동안 경향성이 변할 경우에는 이를 적절히 반영할 수 없다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 특정 회귀모델을 가정하지 않고 이동 직선에 대한 데이터 점들을 통해 회귀모델을 적합시키는 방법으로 기간 내 변화하는 경향성을 파악할 수 있는 LOWESS 경향 분석이 사용되고 있다 (Cleveland and Devlin, 1988; Clow and Mast, 1999; Hirsch et al., 1982; Paul and Linfield, 1997; Lee and Park 2008).

인천연안해역의 수질경향을 정량적으로 분석하기 위해 경향분석을 XLSTAT Version 2023.1.2 통계패키지를 이용하였고, 계절 맨-켄

달 검정을 위한 유의수준은 $\alpha = 0.05$, LOWESS 검정을 위한 평활상수 $f = 0.5$ 로 수행하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 수질오염물질 유달부하량 산정

3.1.1 한강하구 주요하천 수질 조사결과

한강 행주 등 10개 지점의 수질조사 결과는 (Table 4)와 같다. BOD를 기준으로 팔당 Ia(매우 좋음) < 구의·임진강·노량진 Ib(좋음) < 굴포천·행주 II(약간 좋음) < 문산천·나진포천·계양천 III(보통) < 공릉천 IV(약간 나쁨) 순으로 양호한 것으로 조사되었다. 한강의 경우 상류구간(팔당)의 수질이 Ia ~ Ib 등급으로 하류구간(행주) II ~ III 등급보다 양호하였으며, 한강의 유량은 조사지점에 따라 326.6 m³/s ~ 370.2 m³/s 범위를 나타내었다. 임진강의 평균 유량은 141.2 m³/s로 행주지점 대비 39.4 % 수준이며 항목별 수질은 Ib ~ II 등급으로 양호하다. 문산천은 II(TOC) ~ IV(SS)이며, 공릉천은 SS가 III등급(보통)이며 이외 항목은 IV ~ V 등급 나타내었다. 인천권역에는 굴포천, 나진포천 및 계양천이 위치하고 있다. 굴포천은 II(BOD) ~ IV(COD, TP) 등급이며 유량은 행주지점 대비 1.4 % 수준이다. 나진포천과 계양천은 III등급 수준의 수질을 나타내었다.

3.1.2 주요하천 유달부하량 조사결과

주요하천 지점별 유달부하량 산정결과를 (Table 5)와 같이 나타내었다. 한강의 상류인 팔당지점의 BOD 유달부하량은 연간 12,070.0 ton이며 하류인 행주지점은 27,190.7 ton, 2.3 배 수준으로 한강 하류에 근접할수록 부하량이 증가하는 것으로 나타났다. 하류지점인 노량진~행주구간의 유달부하량 차이는 8,490 ton/y로 상대적으로 차이가 컸으며 주요 유입 오염원으로 안양천, 홍제천 등의 하천과 한강 본류로 유입되는 하수처리시설이 있다.

Table 4. Water Quality and Discharge Survey Results(Average 2018 - 2022).

Category	Station	BOD	COD	SS	TN	TP	TOC	Flux
		(mg/L)						(m ³ /s)
Han River	PD	1.0 (I a)	3.7 (I b)	7.2(I ~Ⅲ)	2.452	0.039 (I b)	2.2 (I b)	370.2
	GU	1.4 (I b)	4.0 (I b)	6.9(I ~Ⅲ)	2.601	0.040 (I b)	2.3 (I b)	352.5
	NR	1.9 (I b)	4.7 (Ⅱ)	8.9(I ~Ⅲ)	4.395	0.069 (Ⅱ)	2.9 (I b)	326.6
	HJ	2.5 (Ⅲ)	5.6 (Ⅲ)	20.3(I ~Ⅲ)	5.746	0.103 (Ⅲ)	3.4 (Ⅱ)	358.3
Imjin River	IJ	1.7 (I b)	4.9 (Ⅱ)	20.4(I ~Ⅲ)	3.297	0.068 (Ⅱ)	2.7 (I b)	141.2
	MS	3.9 (Ⅲ)	6.5 (Ⅲ)	55.2 (Ⅳ)	4.301	0.171 (Ⅲ)	4.0 (Ⅱ)	3.3
	GN	5.8 (Ⅳ)	9.7 (Ⅴ)	24.9(I ~Ⅲ)	6.570	0.213 (Ⅳ)	5.2 (Ⅳ)	4.9
Incheon	GP	2.4 (Ⅱ)	7.2 (Ⅳ)	9.1(I ~Ⅲ)	11.765	0.249 (Ⅳ)	4.6 (Ⅲ)	7.9
	NJ	4.4 (Ⅲ)	6.9 (Ⅲ)	12.9(I ~Ⅲ)	4.120	0.178 (Ⅲ)	4.4 (Ⅲ)	0.3
	GY	4.7 (Ⅲ)	6.8 (Ⅲ)	70.3 (Ⅳ)	3.559	0.129 (Ⅲ)	4.1 (Ⅲ)	0.3

* Water Quality Index : I a (very good), I b(good), Ⅱ(fairly good), Ⅲ(fair), Ⅳ(fairly poor), Ⅴ(poor), Ⅵ(very poor)

Table 5. Pollutant Delivery Load Calculation Results(Average 2018 - 2022). (Unit : tons/y)

Category	Station	BOD	COD	SS	TN	TP	TOC
Han River	PD	12,070.0	45,556.5	150,019.6	27,839.1	638.4	28,799.9
	GU	14,518.0	45,750.0	122,326.2	27,456.2	604.3	28,972.0
	NR	18,700.7	48,201.8	120,533.0	38,900.8	828.5	29,465.0
	HJ	27,190.7	61,870.8	258,133.6	56,546.5	1,242.7	37,172.8
Imjin River	IJ	6,167.5	17,293.4	81,747.5	10,648.4	275.0	9,523.2
	MS	439.2	676.0	4,904.7	401.0	18.6	435.8
	GN	820.2	1,408.5	5,053.3	802.3	32.0	735.6
Incheon	GP	645.3	1,807.7	2,384.6	2,888.5	64.3	1,148.3
	NJ	38.2	60.9	159.3	33.9	1.4	38.6
	GY	33.7	55.2	549.0	25.1	1.0	31.7

한강 조사지점 중 최하류인 행주지점 자료를 한강 유달부하량 자료로 사용하였다. 각 권역별 BOD 유달부하량은 한강 77.0 % > 임진강 21.0 % > 인천 2.0 %로 산정되었다. 총 질소의 경우 한강 79.3 % > 임진강 16.6 % > 인천 4.1 % 순으로 조사되었다. 전체 조사항목(BOD 등 6종) 권역별 유달부하량의 평균 기여도는 한강 75.9 % > 임진강 21.4 % > 인천 2.7 %로 대부분 한강과 임진강 권역의 영향으로 조사되었다.

3.1.3 유달부하량 장기경향 통계분석

한강하구 유달부하량에 가장 많은 기여도를 나타내고 있는 행주지점의 지난 10년간(2013년 ~ 2022년) 월평균 수질자료와 유량을 이용하여 유달부하량(n = 120)을 산정하고 계절 맨켄달 검정을 실시하였다(Table 6). *p*-value가 0.05 이하로 통계적으로 유의하여 경향성이 있는 것으로 평가된 항목은 5항목이다. 맨-켄달 기울기 통계량(Sen's slope)으로 살펴본 오염 도감소량은 BOD는 연간 113.5 ton, TP 15.0 ton, NH₃-N 52.5 ton, DIP 14.5 ton 그리고 PO₄-P의 경우에는 13.7 ton의 유달부하량 감소 경향이 있는 것으로 분석되었다.

Table 6. Seasonal Mann-Kendall test results for pollutant delivery load at Hangju station (2013 - 2022).
(Unit : ton/y)

Item	Min	Max	Mean	S.D.	Kendall's tau	p-value	Sen's slope	Trend
BOD	356.8	18,833.0	2,498.1	2,539.7	-0.311	0.006	-113.5	Down
COD	891.9	31,197.1	4,962.4	5,007.0	-0.152	0.174	-61.9	No trend
SS	1,159.3	325,619.9	23,343.1	40,095.6	-0.152	0.069	-230.1	No trend
TN	1,043.6	23,646.4	4,324.2	3,508.6	-0.070	0.494	-12.5	No trend
TP	13.4	1,301.7	143.0	168.0	-0.507	<0.0001	-15.0	Down
TOC	677.9	16,063.4	2,984.9	2,827.5	-0.130	0.211	1.9	No trend
DIN	1,031.1	22,072.0	4,091.7	3,286.6	-0.078	0.446	-16.3	No trend
NH₃-N	45.4	2,874.8	599.4	503.0	-0.426	0.001	-52.5	Down
NO ₃ -N	849.1	17,489.9	2,856.8	2,509.3	0.215	0.079	57.1	No trend
DIP	5.4	880.7	80.0	104.2	-0.578	<0.0001	-14.5	Down
PO₄-P	0.7	836.4	65.1	97.6	-0.567	<0.0001	-13.7	Down
Chlorophyll-a	0.6	111.0	19.1	22.2	0.015	0.873	185.7	No trend

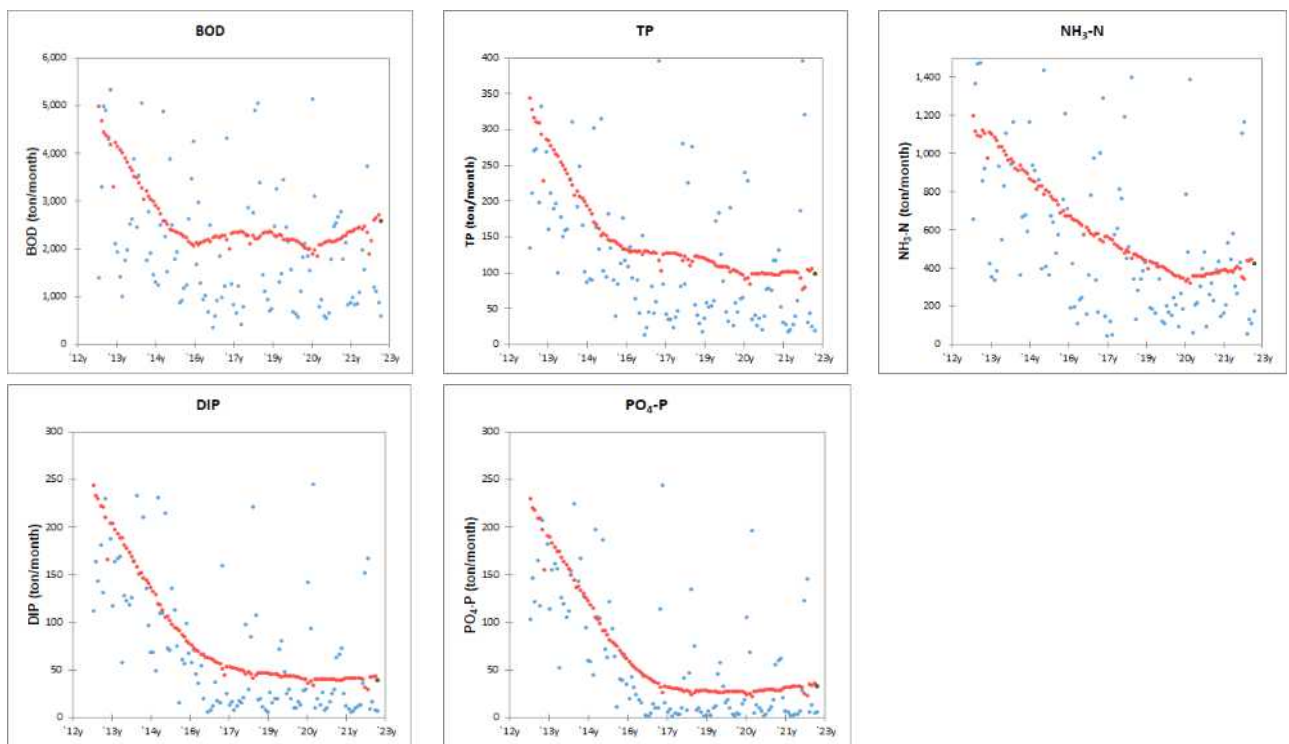


Fig. 4. The LOWESS regression results for pollutant delivery load at Hangju station.

반면 COD, SS, TN, TOC, DIN, NO₃-N, 및 클로로필-a 수질항목은 경향이 없는 것으로 조사되었다.

(Fig. 4)로 행주 지점에서의 수질항목별 경향(2013년 ~ 2022년)을 LOWESS 회귀분석을 통해 시각화 하였다. BOD의 경우 2015년까지

감소하다가 2021년부터 다시 증가하는 추이다. TP, DIP, PO₄-P는 2016년 ~ 2017년까지 급격히 감소하고 이후 안정화 하는 추이다. NH₃-N는 2020년까지 지속적으로 감소하였으나 이후 다시 증가하는 경향으로 분석되었다.

3.2. 인천연안 수질조사 및 시공간적 수질경향 평가

3.2.1 인천연안 해수질 조사결과

2022년 인천연안 34개 정점의 분기별 해양수질 조사결과와 연평균을 (Table 7)로 요약하였다.

생태기반해수수질(WQI) 등급은 평균 II등급(좋음)으로 평가되었다. I등급(매우좋음) 및 II등급(좋음)은 각각 11정점(32.4 %), III등급(보통) 10정점(29.4 %), IV등급 2정점(5.9 %)이었으며, V등급(아주나쁨)은 없는 것으로 조사되었다.

Table 7. Incheon Coastal Marine Water Quality Status in 2022.

Station	WQI		DIN ($\mu\text{g/L}$)	DIP ($\mu\text{g/L}$)	Chloro phyll-a ($\mu\text{g/L}$)	TR ²⁾ (m)	DOb ³⁾ (%)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN ($\mu\text{g/L}$)	TP ($\mu\text{g/L}$)
	Point	Grade ¹⁾									
S-1	30	II	499.6	21.2	2.5	1.3	102.8	2.2	1.7	686.9	37.2
S-2	22	I	464.3	24.6	2.2	1.1	101.7	1.8	1.7	575.5	34.1
S-3	20	I	343.4	23.6	2.2	1.1	107.3	2.1	1.6	425.5	34.2
S-4	55	IV	610.4	46.9	5.0	0.6	104.8	3.0	2.0	697.2	62.5
S-5	38	III	833.2	33.9	1.7	0.8	101.5	2.2	1.6	961.7	41.8
S-6	29	II	275.8	18.2	2.8	1.6	107.2	2.4	1.6	344.8	25.9
S-7	20	I	175.9	13.6	1.9	2.7	105.7	2.2	1.4	252.1	19.6
S-8	26	II	209.9	18.1	2.6	1.9	107.9	2.2	1.5	296.5	26.0
S-9	26	II	195.0	16.4	2.5	2.0	107.4	2.5	1.5	274.2	22.8
S-10	32	II	177.1	14.2	5.2	2.4	108.9	2.0	1.4	253.0	20.0
S-11	20	I	194.1	13.7	2.0	2.2	106.2	2.2	1.3	230.8	17.7
S-12	29	II	213.6	14.0	2.8	1.1	106.8	2.6	1.4	272.8	20.5
S-13	26	II	168.3	13.7	2.5	2.2	107.9	1.8	1.3	228.1	16.2
S-14	20	I	227.9	15.0	1.8	1.8	107.6	2.1	1.4	290.9	19.6
S-15	38	III	356.7	15.5	3.7	0.8	104.2	2.2	1.4	512.7	21.4
S-16	26	II	423.9	22.0	2.2	0.9	102.8	2.5	1.4	532.3	26.1
S-17	36	III	923.5	73.5	2.0	1.4	104.1	2.3	1.7	980.8	92.6
S-18	20	I	152.4	13.2	2.0	2.1	105.8	2.2	1.4	233.7	18.7
S-19	39	III	507.6	25.2	3.2	0.9	102.1	3.1	1.4	604.2	29.2
S-20	44	III	901.3	35.0	2.2	0.4	102.6	2.4	1.5	1,085.9	41.3
S-21	38	III	367.5	24.1	2.9	0.7	104.2	3.3	1.3	472.7	29.2
S-22	47	IV	1,019.5	36.4	2.2	0.3	101.3	3.2	1.6	1,188.3	42.4
S-23	45	III	733.6	31.7	2.2	0.4	101.2	3.1	1.5	851.9	38.1
S-24	44	III	1,096.5	34.6	1.9	0.4	100.8	2.3	1.6	1,259.1	41.4
S-25	30	II	724.2	31.4	1.6	1.1	102.4	2.7	1.4	817.0	39.2
S-26	32	II	199.6	17.0	3.4	1.3	106.7	2.5	1.6	282.7	26.5
S-27	38	III	404.3	22.2	4.1	0.8	104.3	2.7	1.4	491.4	25.8
S-28	20	I	116.5	13.5	1.4	2.3	106.3	1.8	1.2	160.1	16.4
S-29	20	I	121.2	13.8	1.6	2.5	107.5	1.9	1.2	166.4	17.4
S-30	20	I	115.2	13.9	1.2	2.1	106.2	1.8	1.2	165.0	17.6
S-31	40	III	631.1	30.4	1.8	0.5	103.0	3.2	1.4	752.7	39.7
S-32	23	I	297.2	16.5	2.2	1.2	105.3	2.3	1.4	374.0	21.7
S-33	20	I	138.3	14.4	1.3	2.2	105.4	1.7	1.2	173.7	17.2
S-34	29	II	163.9	15.3	3.0	1.6	106.5	1.7	1.4	208.0	21.0
Max	55	I	1,096.5	73.5	5.2	2.7	108.9	3.3	2.0	1,259.1	92.6
Min	20	IV	115.2	13.2	1.2	0.3	100.8	1.7	1.2	160.1	16.2
Avg.	31	II	411.2	23.1	2.5	1.3	104.9	2.4	1.5	503.0	30.0

note: 1) I (very good), II(good), III(moderate), IV(bad), V (very bad).

2) "TR" stands for the transparency of seawater.

3) "DOb" stands for the Dissolved Oxygen in the bottom water.

Table 8. Seasonal Mann-Kendall test results for water quality in the Incheon coastal area(2013 - 2022).

Station	DIN	DIP	Chloro phyll-a	TR	DOb	COD	TOC	TN	TP	WQI
S-1										Down
S-2										
S-3										
S-4				Down		Up				
S-5					Up					Down
S-6										
S-7								Down		
S-8								Down		
S-9										
S-10					Up					
S-11									Down	
S-12		Down		Down				Down	Down	
S-13									Down	
S-14										
S-15		Down	Down							Down
S-16										Down
S-17		Down			Up		Down	Down	Down	Down
S-18					Up				Down	
S-19			Down					Down		Down
S-20					Up					Down
S-21					Up					Down
S-22		Down			Up					Down
S-23			Down					Down		Down
S-24					Up					Down
S-25					Up					Down
S-26								Down		
S-27			Down							Down
S-28					Up	Up		Down	Down	
S-29									Down	
S-30										
S-31			Down							Down
S-32		Down							Down	Down
S-33										
S-34					Up				Down	

Blank : No trend, 'Up' : Upward, 'Down' : Downward

I 등급은 덕적도, 문갑도 및 장봉도 등 주로 육상기인 오염원의 영향이 적은 외해에 많이 분포하고 있다. 반면 IV등급 중 S-4(오이도 서방)는 시화조력발전소, 하수처리시설, 항·포구 등 육상기인 오염물질의 영향을 많이 받는 지역이며, 수질오염 주요인자는 투명도, DIN, DIP, 클로로필-a 이다. S-22(강화도 창후리 앞바다)는 한강 및 예성강 등의 하구에 위치하고 있으며 투명도와 DIN이 주요영향인자로

평가되었다. DIN 평균 농도는 411.2 $\mu\text{g/L}$ 로 수질평가 지수 상의 해역별 기준값(서해중부 425 $\mu\text{g/L}$)과 유사한 수준이었다. DIN 농도가 1,000 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 높은 지역은 S-22(강화도 창후리 앞바다) 및 S-24(강화도 초지리 앞바다)로 조사되었다. DIP의 평균농도는 23.1 $\mu\text{g/L}$, 최대농도는 S-17(만석부두 앞)이 73.5 $\mu\text{g/L}$ 로 가좌하수처리시설 및 인천교유수지 등의 영향을 주로 받고 있다. 클로로필-a의 평균

농도는 $2.5 \mu\text{g/L}$ 이며, 최고농도는 S-10(영흥도 북방)정점에서 $5.2 \mu\text{g/L}$ 로 조사되었다. 인천연안의 적조(red tide)는 2004년 8월 9일 대무의도, 영흥도, 대부도, 인천송도 및 인천남항 일대에서 발생했으며, 2013년 인천남항 해역에서 6월 12일 ~ 14일 기간동안 발생하였다(NIFS, 2024). 투명도는 평균 1.3 m , 최소는 0.3 m 이며 S-22(강화도 창후리 앞바다) 정점에서 조사되었다. 주로 강화도 인근 해역에서 예성강 및 한강하구 육상오염원과 강한 조류의 영향으로 투명도가 낮게 측정되었다. 저층산소는 전정점에서 100 % 이상의 포화도를 나타내었다. COD는 평균 2.4 mg/L , 최대 3.3 mg/L 로 강화도 주변 해역에서 높았다, TOC는 평균 1.5 mg/L , 최고농도정점은 S-4(오이도 서방)에서 2.0 mg/L 로 조사되었으며 시화조력발전소, 소래포구 등 육상기인오염원의 영향을 주로 받았다. TN은 평균 $503.0 \mu\text{g/L}$, 최대 $1,2591 \mu\text{g/L}$ 로 강화도 주변 해역에서 높았다. TP는 평균 $30.0 \mu\text{g/L}$, 최대 $92.6 \mu\text{g/L}$ 로 S-17(만석부두 앞)에서 높은 농도를 나타내었다.

3.2.2 시공간적 수질경향 평가

인천연안 34개 정점의 분기별 수질자료(2013년 ~ 2022년)를 이용하여 계절 맨켄달 검정을 실시하고 (Table 8)과 같이 경향성 유무를 살펴보았다. 수질이 개선된 항목은 수질 항목 6종(DIP, 클로로필-a, 저층산소포화도, TOC, TN 및 TP)과 생태기반 해수수질(WQI)이다. 반면 수질이 악화된 항목은 COD 및 투명도이며, 전체 정점에서 맨-켄달 검정결과가 통계적으로 유의하지 않아 경향이 없는 항목은 DIN 1종으로 평가되었다.

3.2.2.1 DIP(Dissolved Inorganic Phosphorus)

DIP는 생태기반 해수수질 기준의 수질평가 항목중 하나로 인천이 위치한 서해중부 지역의 기준값은 $31 \mu\text{g/L}$ 이다. S-12, 15, 17, 22 및 32 총 5개 정점에서 감소경향으로 나타나

수질이 개선된 것으로 평가되었으며, (Fig. 5)는 정점별 수질경향 공간분포를 나타내고 있다.

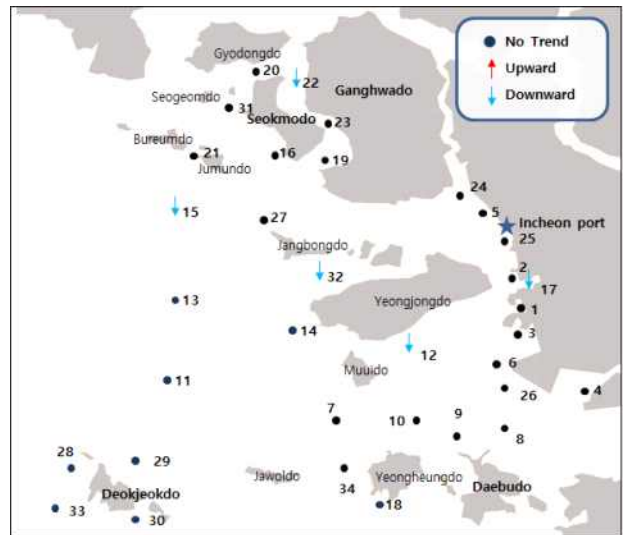


Fig. 5. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Dissolved Inorganic Phosphorus(DIP).

DIP 감소경향 정점들의 시간적인 농도 변화를 (Fig. 6)과 같이 나타내었다. S-12(무의도 동방)은 2017년도부터 감소경향을 나타내었으며 지난 10년동안의 맨-켄달 기울기 통계량은 $-0.560 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 오염도 감소 경향을 나타내었다. S-15(강화 주문도 서방)과 S-32(장봉도 동남방)는 강화도 석모수로의 영향을 많이 받는 해역으로 2018년 1분기까지 증가하고 이후 감소하는 경향이 유사하였으며 각각 $-0.484 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 및 $-0.606 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 의 감소경향을 나타내었다. S-17(만석부두 앞)은 인천교유수지 등 주변 육상오염원의 영향으로 인천연안 34개 정점 중 가장 DIP 농도(2022년 $73.5 \mu\text{g/L}$)가 높은 정점이다. 2015년 4분기 까지 농도 증가 후 감소하였으나, 2020년 2분기부터 다시 증가하는 추이이다. 감소 기울기는 $-2.309 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 를 나타내었다. S-22(강화도 창후리 앞바다)는 석모수로 상류에 위치하고 있다. 시간적 경향은 2016년 2분기까지 감소 경향을 나타내었고, 2019년 1분기까지 증가하였으며 이후 급격히 감소하였다. 연평균 $1.084 \mu\text{g/L}$ 의 감소경향이 있는 것으로 평가된다.

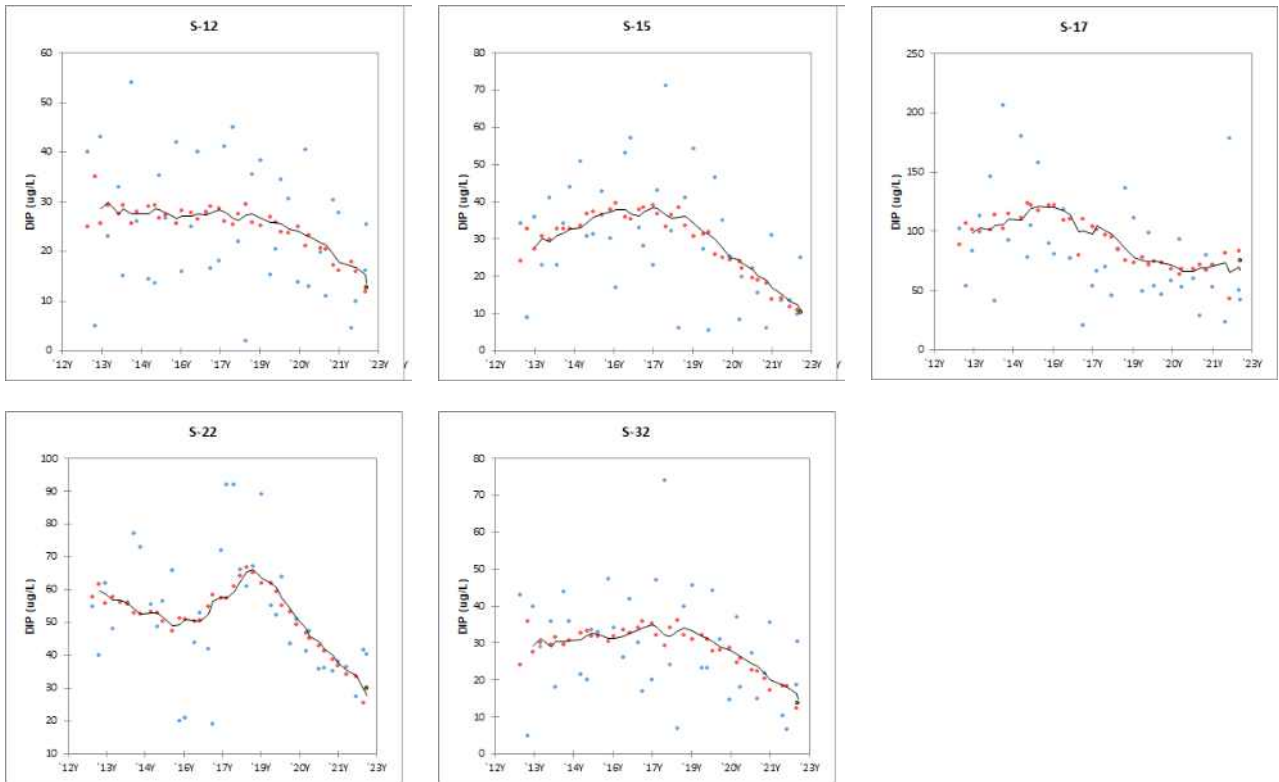


Fig. 6. Temporal variations and long-term trends of Dissolved Inorganic Phosphorus(DIP).

3.2.2.2 클로로필-a(Chlorophyll-a)

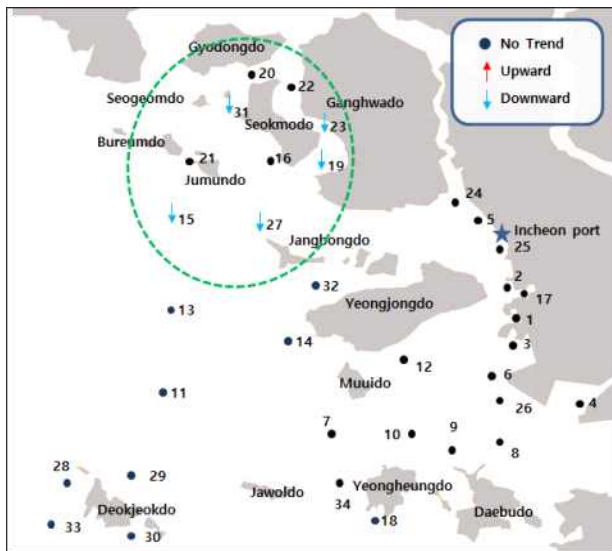


Fig. 7. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Chlorophyll-a.

클로로필-a는 생태기반 해수수질 기준의 평가 항목중 하나로 인천이 위치한 서해중부 지역의 기준값은 $2.2 \mu\text{g/L}$ 이다. S-15, 19, 23, 27 및 31 총 5개 정점에서 감소 경향으로 수질이 개선되었다.

(Fig. 7)은 정점별 클로로필-a의 공간분포를 나타내고 있으며 주로 강화 석모수로 영향 해역에서 감소경향이 있는 것으로 평가된다. 클로로필-a 조사정점의 시간적인 경향을 (Fig. 8)과 같이 나타내었다. S-15(강화 주문도 서남방) 정점은 2017년 3분기($30.0 \mu\text{g/L}$) 까지 증가 후 감소하는 추이이며 기울기는 $-0.067 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-19(강화도 선수선착장 앞)은 2015년까지 감소이후 연평균 $1.5 \sim 8.3 \mu\text{g/L}$ 의 범위를 보이고 있으며 기울기는 $-0.114 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-23(강화도 외포리 앞바다)은 2017년도 1분기 까지 감소경향 후 증가하여 2018년 1분기 $16.4 \mu\text{g/L}$ 로 최고농도를 보인 후 감소하는 경향이다. 기울기는 $-0.134 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-27(강화 장봉도 서북방)은 2017년 3분기($28.6 \mu\text{g/L}$) 최대 농도 이후 감소하는 경향으로 기울기는 $-0.107 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-31(강화 석모도 서방)는 2016년 3분기까지 감소 후 2017년 3분기 $25.9 \mu\text{g/L}$ 로 최고농도를 보이고 다시 감소하는 경향이다. 기울기는 $-0.137 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다.

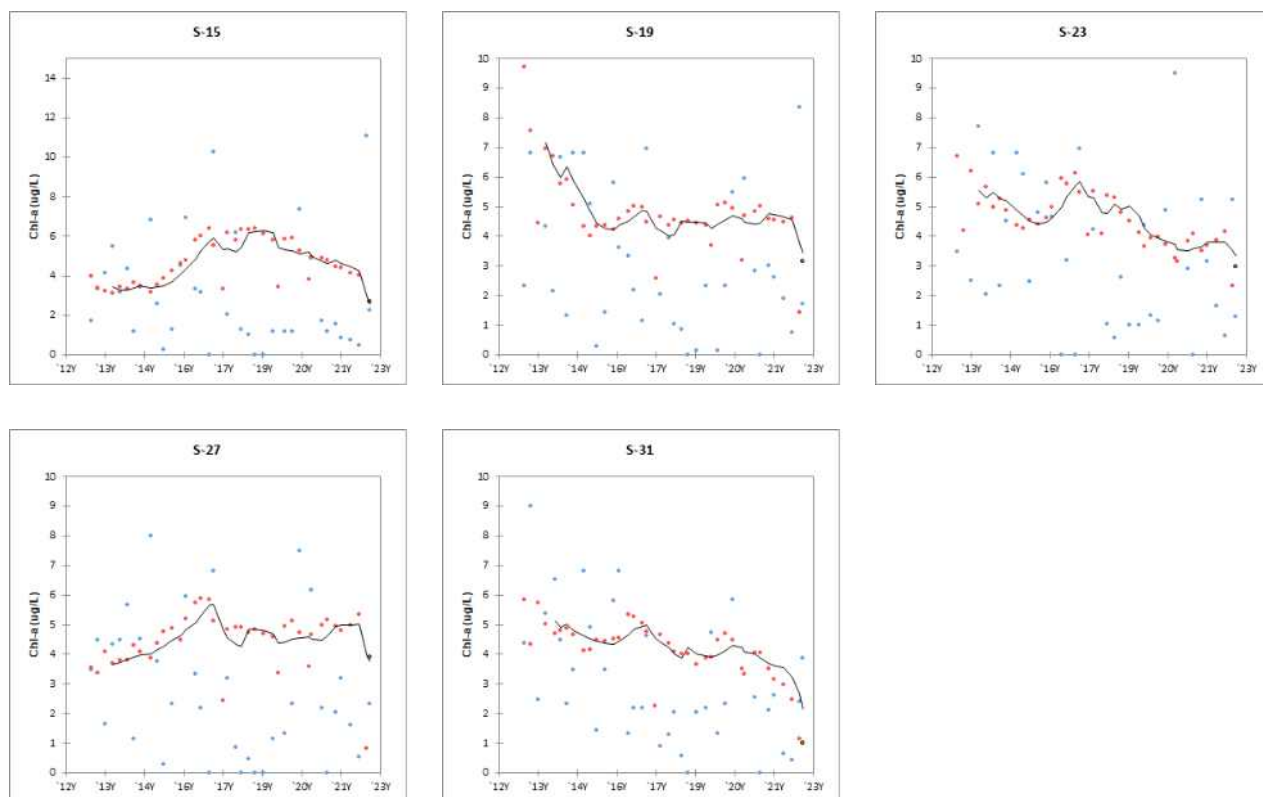


Fig. 8. Temporal variations and long-term trends of Chlorophyll-a.

3.2.2.3 투명도(Transparency)

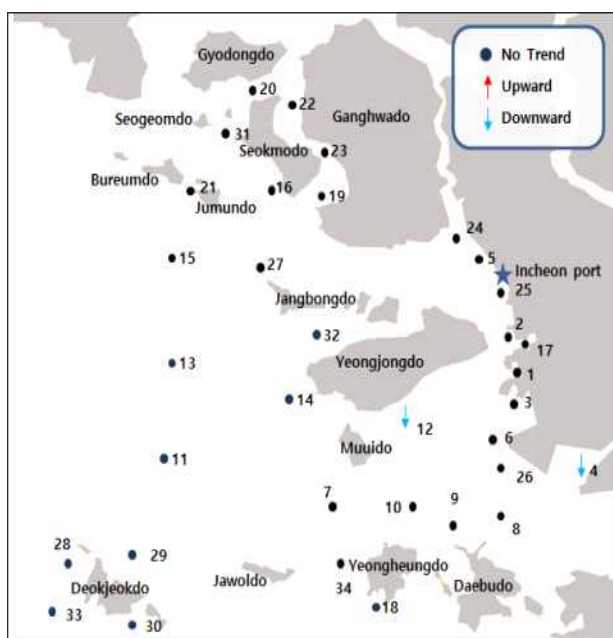


Fig. 9. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for transparency.

투명도는 생태기반 해수수질 기준의 평가 항목중 하나로 인천이 위치한 서해중부 지역의 기준값은 0.9 m이다. 투명도는 S-4 및 S-12의 2개 정점에서 감소 경향으로 수질이 악화되었다(Fig. 9).

투명도 조사 정점의 시간적인 경향을 (Fig. 10)과 같이 나타내었다. S-4(오이도 서방)은 시화조력발전소, 항·포구 및 환경기초 시설 등의 영향을 받는 해역으로 2017년(평균 1.5 m) 이후부터 감소하였으며, 2022년에는 평균 0.6 m로 조사되었다. 기울기는 $-0.031 \text{ m} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-12(무의도 동방)은 인천항로 준설공사 등의 영향을 주로 받는 해역으로 2013년 평균 1.5 m에서 2022년 1.1 m로 투명도가 0.4 m 감소하였으며 기울기는 $-0.039 \text{ m} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다.

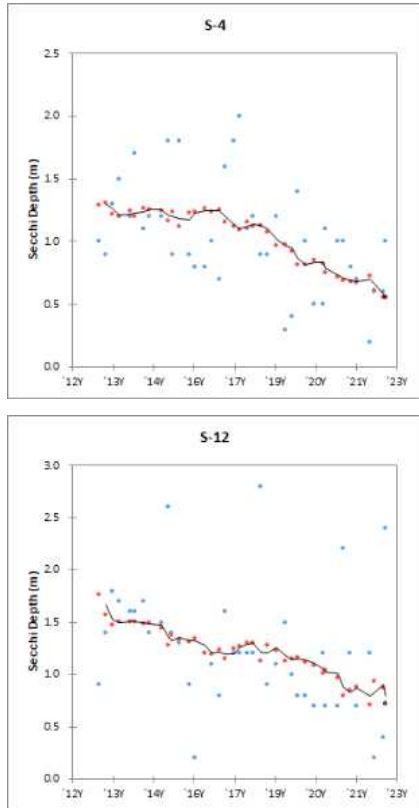


Fig. 10. Temporal variations and long-term trends of transparency.

3.2.2.4 저층산소포화도(DOb, Dissolved Oxygen in the bottom layer)

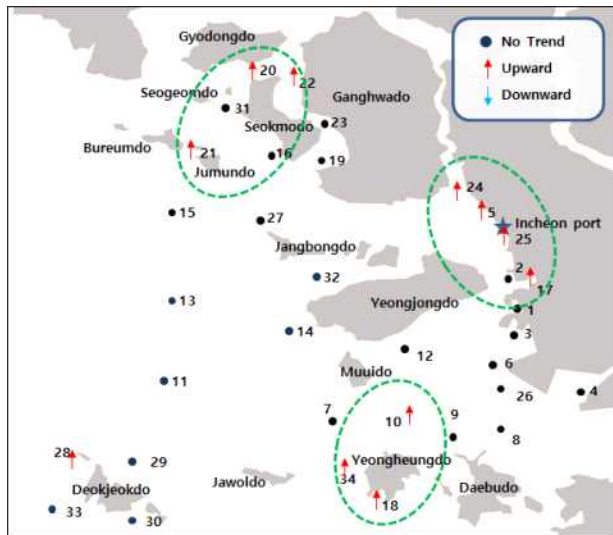


Fig. 11. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Dissolved Oxygen saturation in the bottom water.

저층산소포화도는 생태기반 해수수질 기준의 평가 항목중 하나로 인천이 위치한 서해중

부 지역의 기준값은 90 % 이다. 총 11개 정점(S-5, 10, 17, 18, 20 ~ 22, 24, 25, 28 및 34)에서 증가경향으로 나타나 수질이 개선된 것으로 평가되었다. (Fig. 11)은 정점별 수질경향 공간분포를 나타내고 있으며, 강화도 석모수로 영향해역군(S-20 ~ 22), 염하수로 영향해역군(S-5, 17, 24, 25) 및 영흥도 인근(S-10, 18, 34)의 3개 해역군과 덕적도 서방(S-28) 정점으로 구분되었다.

저층산소포화도 조사 정점의 시간적인 경향을 (Fig. 12)과 같이 나타내었다. 석모수로 영향해역(S-20 ~ 22)의 경향이 유사하였다. 2019년까지 지속적 증가 후 2022년까지 점진적으로 감소하는 패턴이며 2022년 현재 정점별 저층산소포화도는 101.3 % ~ 104.2 %로 양호하였다. 염하수로 영향 해역(S-5, 17, 24, 25)도 석모수로 영향 해역과 동일한 패턴으로 증가 후 감소 경향이며 2022년 현재 100.8 % ~ 104.1 % 범위를 나타내고 있다. 영흥도 인근 해역(S-10, 18, 34)은 2017년 ~ 2018년도부터 저층산소포화도가 증가하였고 2021년도부터 다시 감소하는 경향이다. S-28(덕적도 서방)은 2013년 90.2 %로 가장 낮은 농도를 보였으나 이후 증가하는 추이로 2022년 평균은 106.3 %로 양호하였다.

3.2.2.5 COD(Chemical Oxygen Demand)

COD는 S-4(오이도 서방) 및 S-28(덕적도 서방) 2개 정점에서 증가경향으로 나타나 수질이 악화된 것으로 평가되었다. (Fig. 13)은 정점별 수질경향 공간분포를 나타내고 있다. S-4(오이도 서방)는 주변 육상기인오염원의 영향, S-28(덕적도 서방)은 어촌뉴딜300 등의 개발사업의 영향으로 판단된다.

COD 조사 정점의 시간적인 농도경향을 (Fig. 14)와 같이 나타내었다. S-4(오이도 서방)해역은 2013년도부터 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었으며 기울기는 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-28(덕적도 서방)은 2018년까지 증감을 반복하였으나 2019년도부터 증가하는 경향을 보이고 있다.

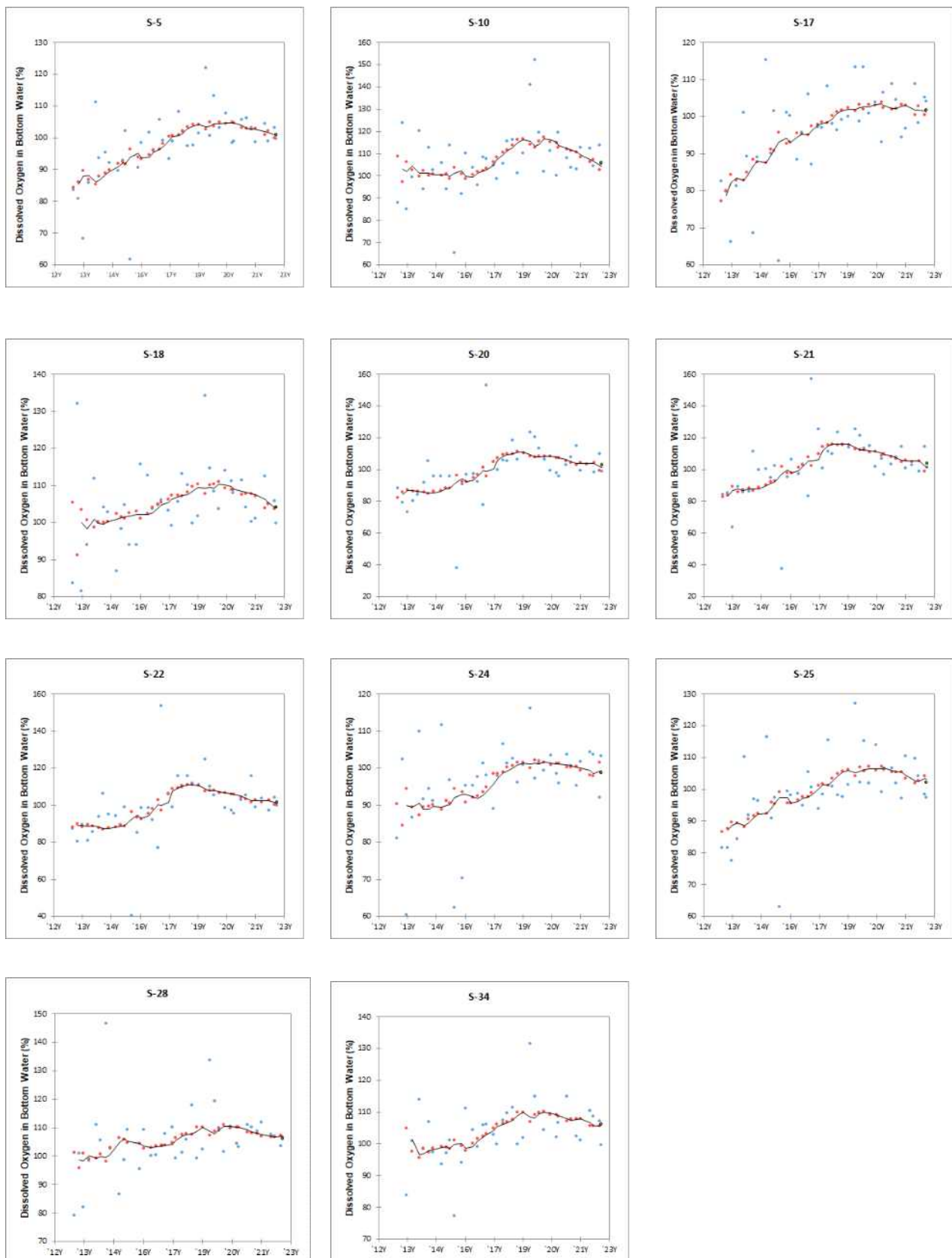


Fig. 12. Temporal variations and long-term trends of Dissolved Oxygen saturation in the bottom layer.

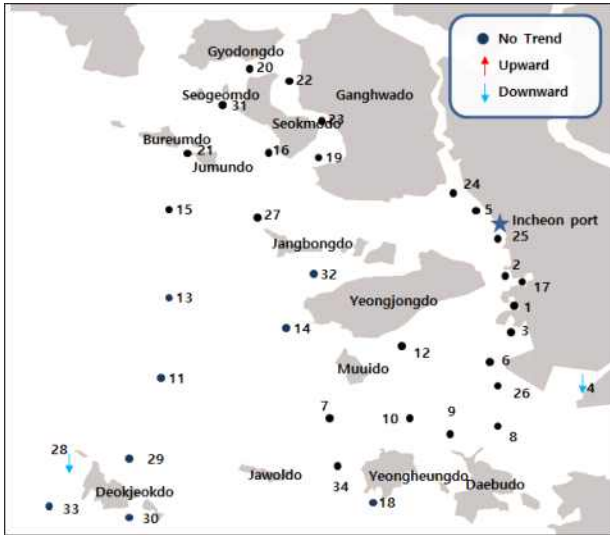


Fig. 13. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Chemical Oxygen Demand(COD).

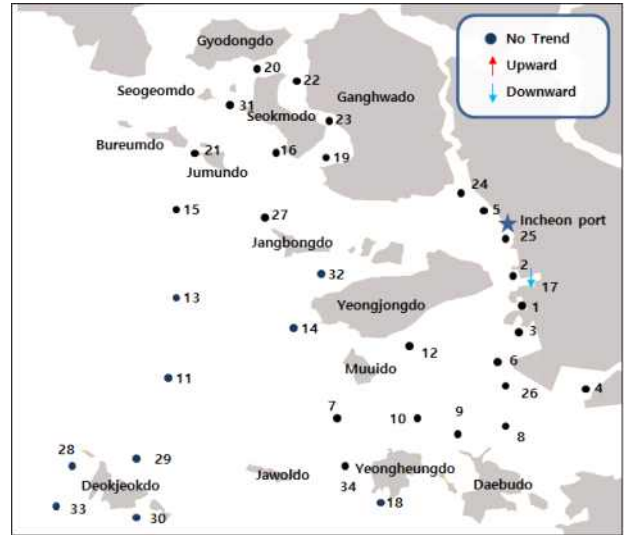


Fig. 15. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Total Organic Carbon(TOC).

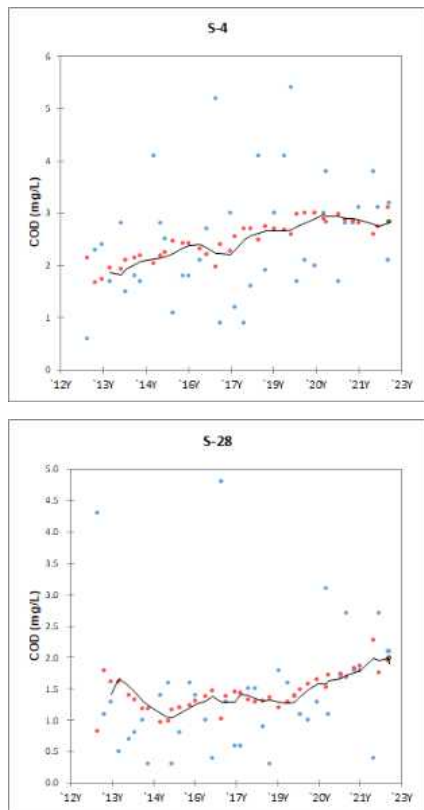


Fig. 14. The LOWESS regression results for COD.

3.2.2.6 TOC(Total Organic Carbon)

TOC는 S-17(만석부두 앞) 1개 정점에서 감소 경향으로 나타나 수질이 개선된 것으로 평가되었다. 정점별 수질경향 공간분포는 (Fig 15)와 같다.

S-17 정점의 시간적인 농도경향을 (Fig. 16)과 같이 나타내었다. 2015년 평균 4.831 mg/L 가장 높은 농도를 보인 이후로 급격히 농도가 감소하였으며 2022년 연평균 농도는 1.738 mg/L로 36.0 % 수준으로 감소하였다. 기울기는 $-0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다.

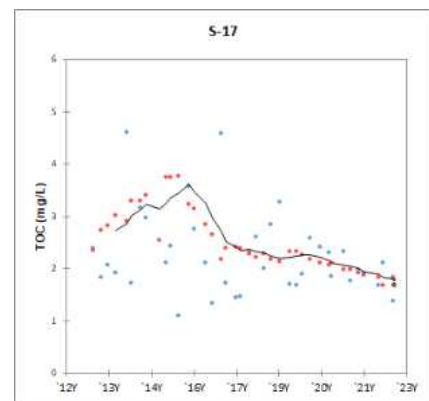


Fig. 16. The LOWESS regression results for TOC.

3.2.2.7 TN(Total Nitrogen)

TN은 S-7, 8, 12, 17, 19, 23, 26 및 28의 총 8개 정점에서 수질이 개선된 것으로 평가되었다. (Fig. 17)은 정점별 수질경향 공간분포를 나타내고 있으며, 강화도 석모수로 영향해역군(S-19 및 23), 인천 근해역군(S-7, 8, 12, 17, 26) 및 덕적도 서방(S-28) 정점으로 구분되었다.

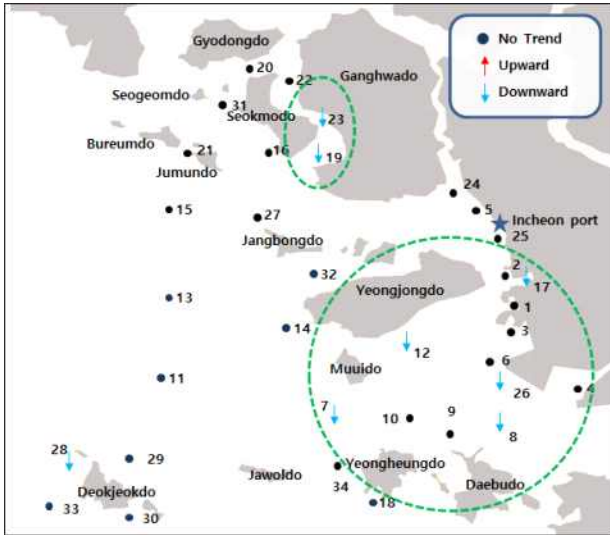


Fig. 17. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Total Nitrogen(TN).

TN의 시간적인 변화추이를 (Fig. 19)와 같이 나타내었다. 석모수로 해역 S-19(강화도 선수선착장 앞)은 2016년($1,175.8 \mu\text{g/L}$) 최고농도 이후 지속적으로 감소하여 2022년 $604.2 \mu\text{g/L}$ 로 48.6 % 감소하였으며 기울기는 $-15.9 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-23(강화도 외포리 앞바다)도 해마다 증감을 반복하며 감소하는 경향을 나타내었으며 기울기는 $-27.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. 인천 근해역군 중 S-7(영흥도 서북방), S-8(큰가리섬 서방) 및 S-12(무의도 동방)은 인접 해역에 위치하여 경향이 유사하였다. 2015~2016년도부터 증가하기 시작하여 2017년 최고농도 이후 급격히 감소하여 안정화하는 경향을 나타내고 있다. 기울기는 S-7 정점 $-9.4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$, S-8 정점 $-17.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$, S-12 정점 $-10.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 각각 분석되었다. S-17(만석부두 앞)은 꾸준히 감소하는 경향이며 2022년 TN의 농도는 $980.8 \mu\text{g/L}$ 로 10년 전 농도($2614.5 \mu\text{g/L}$)에 비해 62.5% 감소한 것으로 평가되었다. 기울기는 $-74.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-26(LNG기지 서방)은 2018년 $497.5 \mu\text{g/L}$ 에서 2022년 $282.7 \mu\text{g/L}$ 로 꾸준히 감소하는 추이이며 기울기는 $-10.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-28(덕적도 서방)은 2017년 $536.0 \mu\text{g/L}$ 로 가장 높았으며 이후 지속적으로 감소(기울기 $-7.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$)하여

2022년 $160.1 \mu\text{g/L}$ 로 29.9% 수준으로 조사되었다.

3.2.2.8 TP(Total Phosphorus)

TP는 S-11 ~ 13, 17, 18, 28, 29, 32 및 34, 총 9개 정점에서 감소경향으로 나타나 수질이 개선된 것으로 평가되었다. 정점별 수질경향 공간분포는 (Fig. 18)과 같으며, 주로 외해에서 감소경향이 뚜렷하였다.

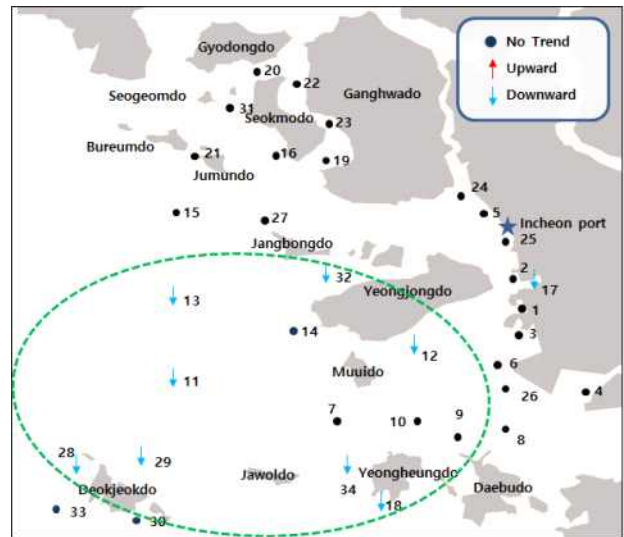


Fig. 18. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Total Phosphorus(TP).

TP의 시간적인 농도경향을 (Fig. 20)과 같이 나타내었다. S-17(만석부두 앞)는 2014~2017년 평균 $185.4 \mu\text{g/L}$ 로 높은 농도를 보였으나 이후 감소하여 2022년 $92.6 \mu\text{g/L}$ 로 50.1% 감소하였다. 기울기는 $-4.267 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 조사되었다. S-11(덕적도 북방 2) 정점은 2016~2018년 평균 $37.6 \mu\text{g/L}$ 로 가장 높은 농도를 보인 후 감소하였다. 2022년 평균은 $17.7 \mu\text{g/L}$ 로 기울기는 $0.395 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 이다. S-12(무의도 동방), S-13(덕적도 북방 3), S-18(영흥도 남방) 및 S-28(덕적도 서방)은 2018년에 최고농도를 보인 후 감소하는 경향이 유사하게 나타났다 각각 기울기는 -0.788 , -0.342 , -0.541 , $-0.394 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 분석되었다. S-29(덕적도 북방 1) 정점은 2016년 평균 $46.0 \mu\text{g/L}$ 로 최고농도를 보인 이후 감소하여 2022년에는 $17.4 \mu\text{g/L}$ (62.2 % 감소) 수준이다. 기울기는 $-0.662 \mu\text{g} \cdot$

$L^{-1} \cdot y^{-1}$ 이다. S-32(장봉도 동남방)는 2015~2018년에 평균 $45.1 \mu g/L$ 로 높은 농도를 보인 후 감소하여 2022년 $21.7 \mu g/L$ 로 51.9 % 감소하였다 기울기는 -

$0.910 \mu g \cdot L^{-1} \cdot y^{-1}$ 이다. S-34(영흥도 서방)는 2015년 평균 $59.5 \mu g/L$ 로 최고농도를 보였고 이후 지속적으로 감소추세이며 기울기는 $-0.817 \mu g \cdot L^{-1} \cdot y^{-1}$ 이다.

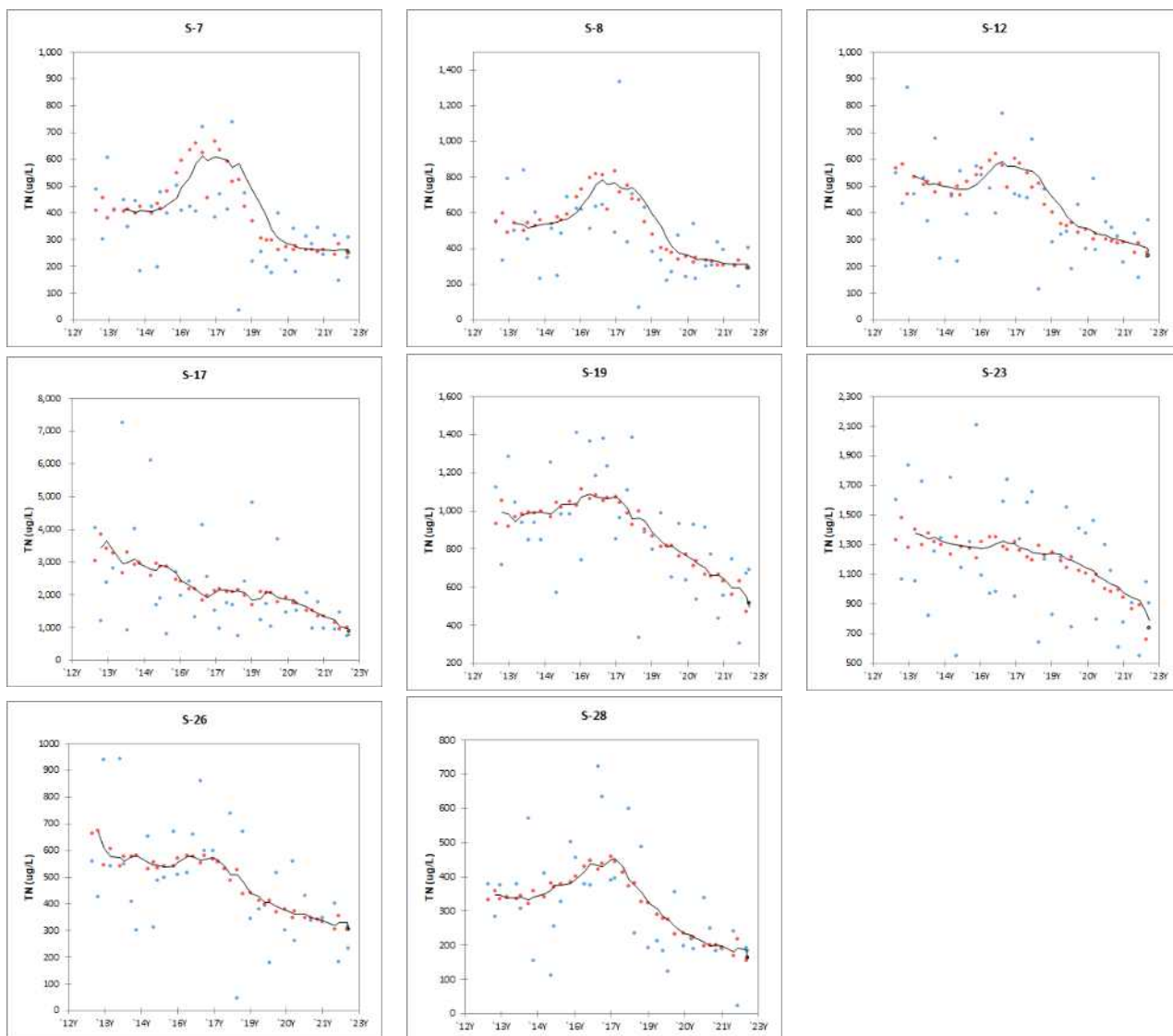


Fig. 19. Temporal variations and long-term trends of total nitrogen(TN).

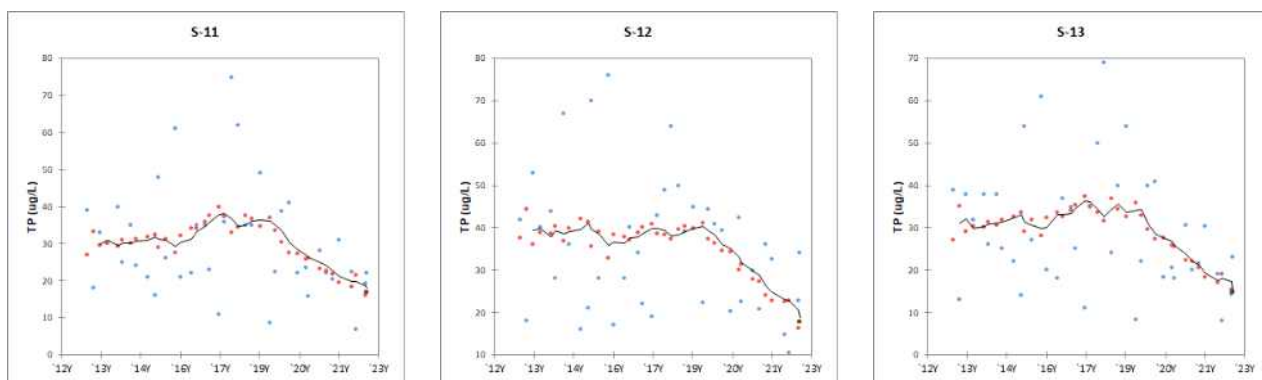


Fig. 20. Temporal variations and long-term trends of total Phosphorus(TP).

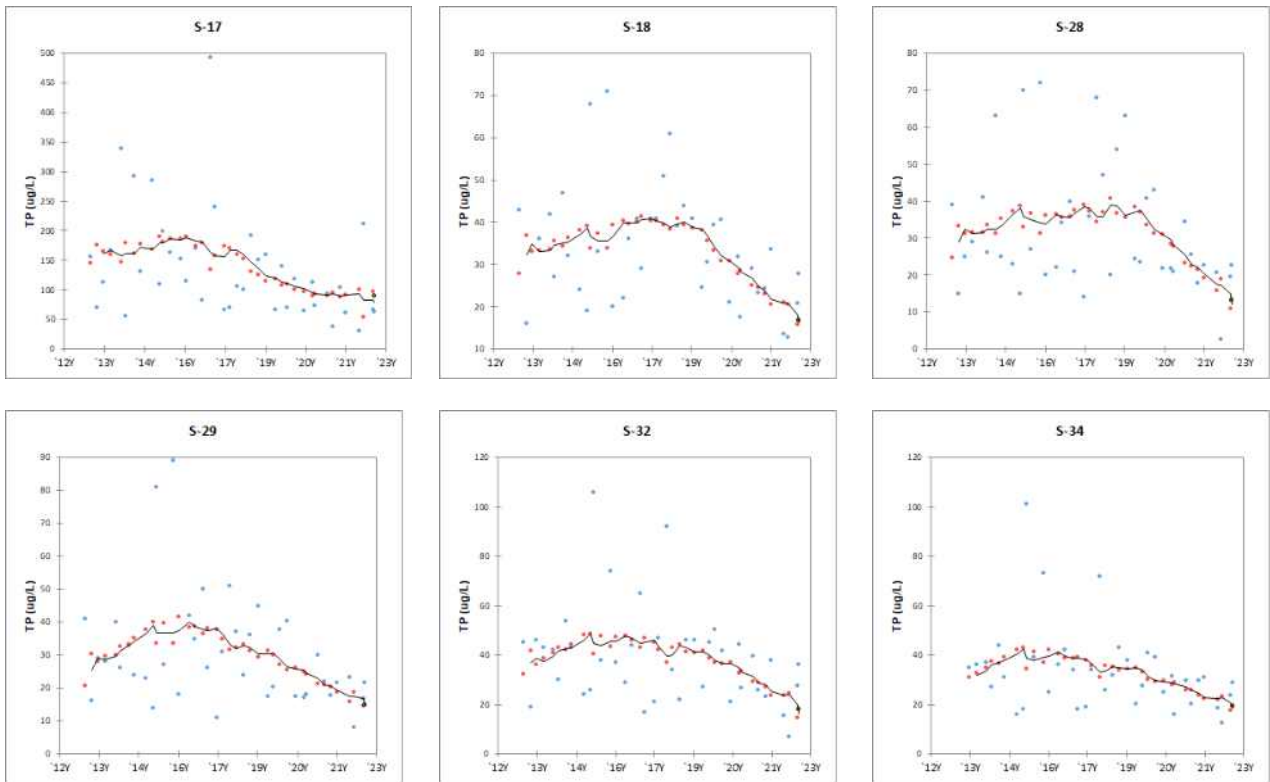


Fig. 20. Temporal variations and long-term trends of total Phosphorus(TP). (continued)

3.2.2.9 WQI(Water Quality Index)

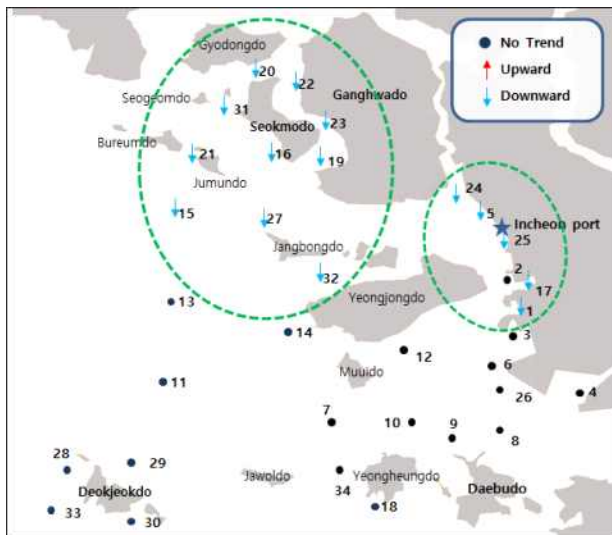


Fig. 21. The spatial distribution patterns of Seasonal Mann-Kendall test results for Water Quality Index(WQI).

WQI는 DIN, DIP, 클로로필-a, 투명도 및 저층산소포화도 5개 개별 측정항목을 종합적

으로 고려한 생태계기반 해역수질기준 이다. WQI는 석모수로 영향해역(S-15, 16, 19~23, 27, 31 및 32의 10정점)과 염하수로 영향해역(S-1, 5, 17, 24 및 25의 5정점) 총 15개 정점에서 감소경향이 통계적으로 유의한 것으로 조사되었다(Fig. 21, Table 9). 석모수로 영향해역의 감소경향의 주요원인은 DIP, 클로로필-a의 감소 및 저층산소포화도의 증가로 평가되며, 염하수로 영향해역은 저층산소포화도의 증가가 주요하였다. WQI 감소경향이 가장 큰 정점은 S-31(강화 석모도 서방) 정점으로 기울기는 $-1.016 \text{ WQI point} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 조사되었다.

WQI 개선경향이 있는 15개 정점의 시간적인 경향을 (Fig. 22)와 같이 나타내었다. 대체로 한강, 임진강 및 예성강 육상기인 오염물질의 직접적인 영향을 받는 받는 염하수와 석모수로 영향해역에 위치한 정점들의 WQI 경향이 유사한 추이를 나타내었다.

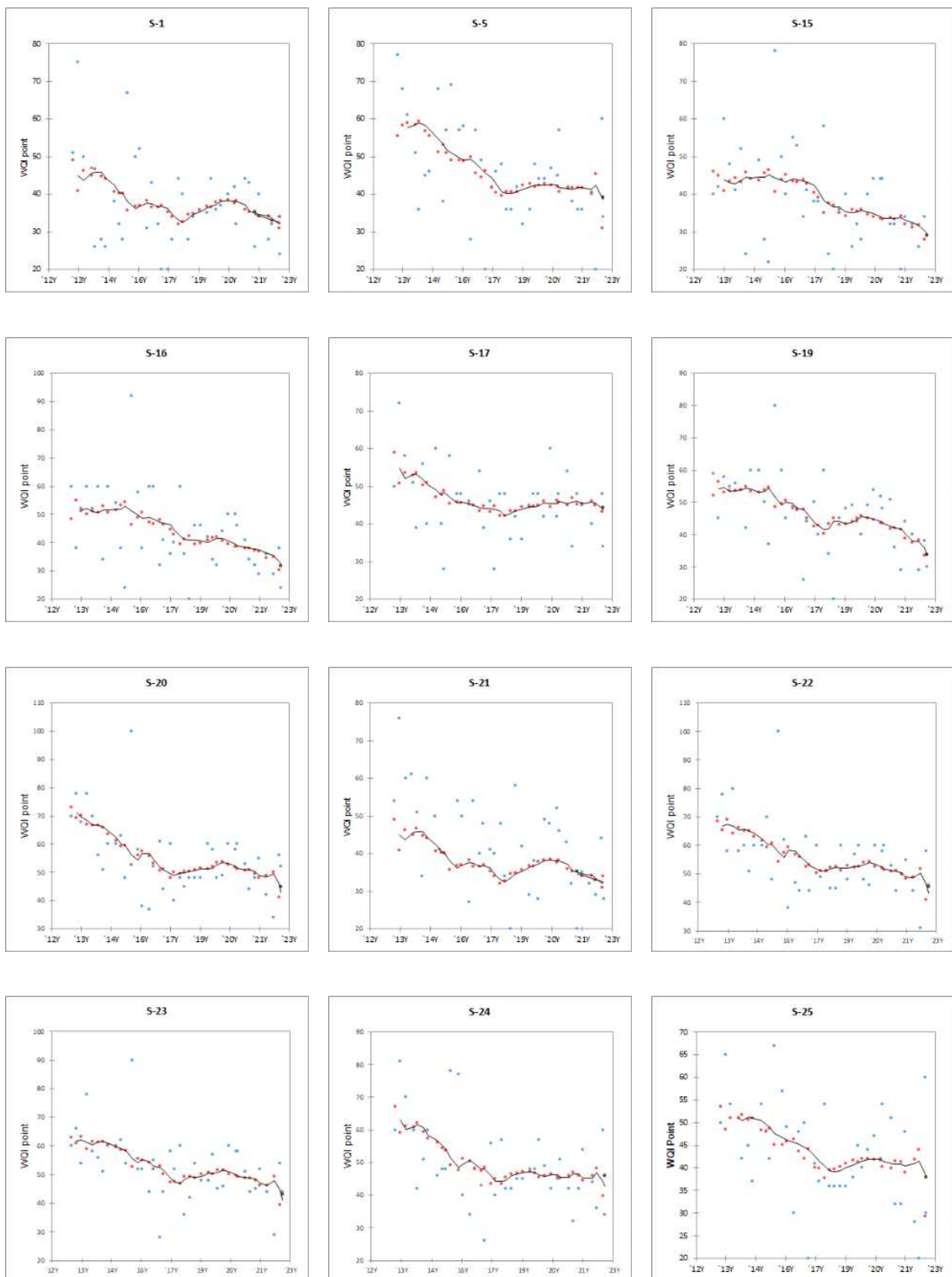


Fig. 22. The LOWESS regression results for WQI.

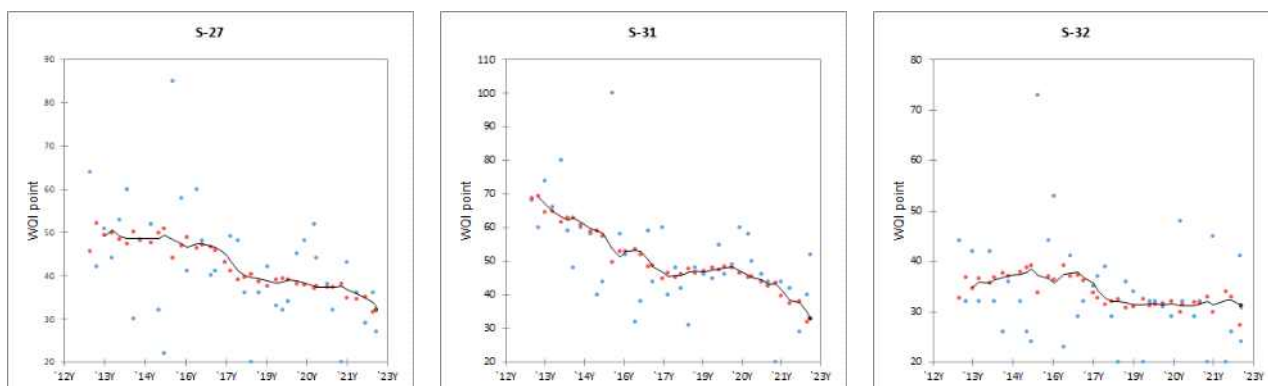


Fig. 22. The LOWESS regression results for WQI. (continued)

Table 9. Seasonal Mann-Kendall test results for WQI at Incheon Coastal(2013 - 2022).

Station	WQI point				Kendall's tau	<i>p</i> -value	Sen's slope
	Min	Max	Mean	Std. deviation			
S-1	20	75	38.1	12.1	-0.290	0.022	-0.383
S-2	20	72	37.7	12.6	-0.252	0.050	-0.466
S-3	20	65	34.0	8.4	-0.212	0.098	-0.281
S-4	26	60	43.4	9.5	0.238	0.099	0.150
S-5	20	77	46.6	13.3	-0.363	0.004	-0.917
S-6	20	56	32.1	8.5	-0.198	0.157	-0.284
S-7	20	52	26.9	7.3	-0.186	0.216	0.000
S-8	20	50	32.4	6.8	-0.094	0.563	0.000
S-9	20	52	31.5	7.6	-0.130	0.387	0.000
S-10	20	52	31.6	6.9	-0.107	0.454	0.000
S-11	20	50	26.9	7.0	-0.018	0.935	0.000
S-12	20	44	30.8	8.2	-0.135	0.229	-0.119
S-13	20	50	27.6	6.8	-0.068	0.657	-0.094
S-14	20	58	28.7	8.2	-0.068	0.616	-0.018
S-15	20	78	38.8	12.2	-0.333	0.018	-0.689
S-16	20	92	44.0	13.9	-0.376	0.006	-0.898
S-17	28	72	46.5	9.3	-0.297	0.011	-0.342
S-18	20	42	28.3	6.8	-0.178	0.193	-0.058
S-19	20	80	46.4	11.5	-0.436	0.001	-0.815
S-20	34	100	55.2	12.6	-0.349	0.005	-0.718
S-21	20	92	44.9	14.7	-0.520	<0.0001	-0.904
S-22	31	100	55.5	12.4	-0.346	0.003	-0.489
S-23	28	90	52.7	11.2	-0.482	<0.0001	-0.629
S-24	26	81	50.1	13.1	-0.314	0.020	-0.527
S-25	20	67	44.0	11.3	-0.306	0.024	-0.399
S-26	20	56	32.5	7.7	-0.119	0.428	-0.056
S-27	20	85	42.4	12.8	-0.339	0.014	-0.741
S-28	20	52	28.2	8.1	-0.162	0.210	-0.181
S-29	20	50	24.8	7.0	-0.007	1.000	0.000
S-30	20	55	26.4	8.0	-0.164	0.194	0.000
S-31	20	100	50.9	14.4	-0.427	0.000	-1.016
S-32	20	73	33.9	10.3	-0.290	0.015	-0.416
S-33	20	50	28.0	7.1	-0.089	0.543	-0.056
S-34	20	44	29.8	7.2	-0.052	0.703	0.000

3.3 해양순환모델을 활용한 해류이동 및 오염물질 확산패턴 분석

3.3.1 모델 검증

동계 모델의 모의 기간은 2020년 2월 1일부터 3월 18일이며, 하계 모델의 모의 기간은 2020년 8월 17일부터 9월 28일이다. 동계와 하계 기간의 조위, 유속, 염분, 유의파고 및 부유사 농도에 대한 모델 결과와 관측 자료를 비교 및 검증하기 위해 평균 오차(mean error, ME), 평균 절대 오차(mean absolute error, MAE) 및 Willmott에 의해 정의된 predicted skill(Skill)을 산출하였다. ME, MAE, Skill에 대해서는 다음과 같이 정의된다. 여기서, M_n 과 O_n 은 각각 모델 결과와 관측 자료에 대한 n 번째 값을 의미한다. \bar{O} 는 관측 자료를 시간 평균한 값을 의미하며, N 은 모델 결과 및 관측 자료의 총 개수이다. ME는 관측 값에 대한 모델 결과의 과소산정 및 과대산정을 나타내는 값이며, 양수일 경우 과대산정을 의미한다. MAE는 관측 값과 모델 결과의 평균 편차를 의미한다. Skill은 관측 값에 대한 모델 결과의 정확도를 의미하며, 0 ~ 1 사이의 값을 나타낸다.

$$ME = \frac{\sum(M_n - O_n)}{N}, \quad (a)$$

$$MAE = \frac{\sum|M_n - O_n|}{N}, \quad (b)$$

$$Skill = 1 - \frac{\sum(M_n - O_n)^2}{\sum(|M_n - \bar{O}| - |O_n - \bar{O}|)^2} \quad (c)$$

Lee et al.(2021)의 경기만 한강 하구에서의 염 수송 메커니즘 연구에서 Willmott(1981)에 의해 제시된 predicted skill(Skill)을 계산함으로써 관측 자료에 대한 FVCOM의 재현성을

정량적으로 평가하였듯이, 해당 모델 결과의 조위, 유속, 염분에 대해서 계산된 Skill은 각각 0.99, 0.95, 0.87 이상으로 나타났으며, 유동 및 염분에 대한 FVCOM의 재현성이 입증되었다.

3.3.2 모델 결과

3.3.2.1 조류 흐름 패턴

경기만 한강하구 홍수기 창조 기간 동안, 한강 상류를 향한 평균 수량은 주로 석모수로부터 염하수로를 통해 더 많이 유입된다(Fig. 23 ~ 24). 석모수로와 연결된 강화도 북단 교동도 인근의 최대 유속보다 염하수로에서 발생하는 최대 유속이 약 1.2배 높다. 석모수를 통과한 유속 흐름들은 교동도 북동쪽에 고립되어 동쪽 방향에 위치한 한강 상류부까지는 영향이 미미하다. 염하수를 통과한 유속 흐름은 한강으로부터의 담수와 만나 북쪽 및 북서쪽으로 전파된다. 낙조 기간동안, 한강으로부터의 유속 흐름은 염하수로 북단을 통해 남쪽 방향으로 전파된다. 강화도 북단의 유속은 0.2 m/s 이하로 한강의 유속과의 연관성은 적으며, 석모수로에서 증가하는 유속흐름은 국지적인 지형조건 및 수심 변화에 따라 주로 파생된다.

3.3.2.2 담수 확산 패턴

한강 및 임진강의 담수는 염하수를 통하여 외해방향으로 더 멀리 확산된다 (Fig. 25 ~ 26). 최강 창조 시, 석모수로와 염하수의 상류는 담수가 지배적으로 분포하며, 염하수를 통해 담수는 남향까지 영향을 미친다. 최강 낙조 시, 조류에 의해 담수는 더 멀리 확산되어 염하수를 통해 인천대교 및 팔미도 인근까지 영향을 미친다. 석모수를 통한 담수 확산 거리는 창조와 낙조 기간 모두 석모도 남쪽 인근 지역으로 동일하다.

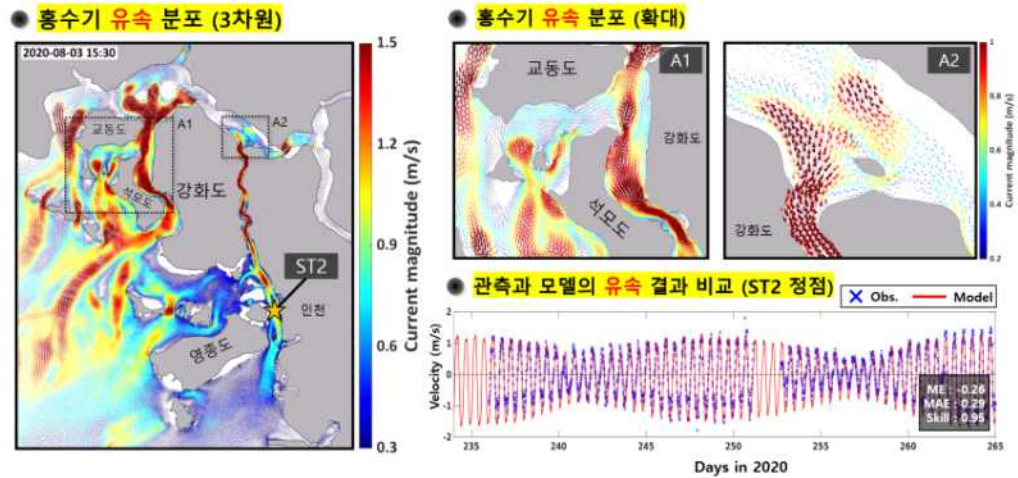


Fig. 23. The spatial distribution of current flows at the peak flood tide during the flood season.

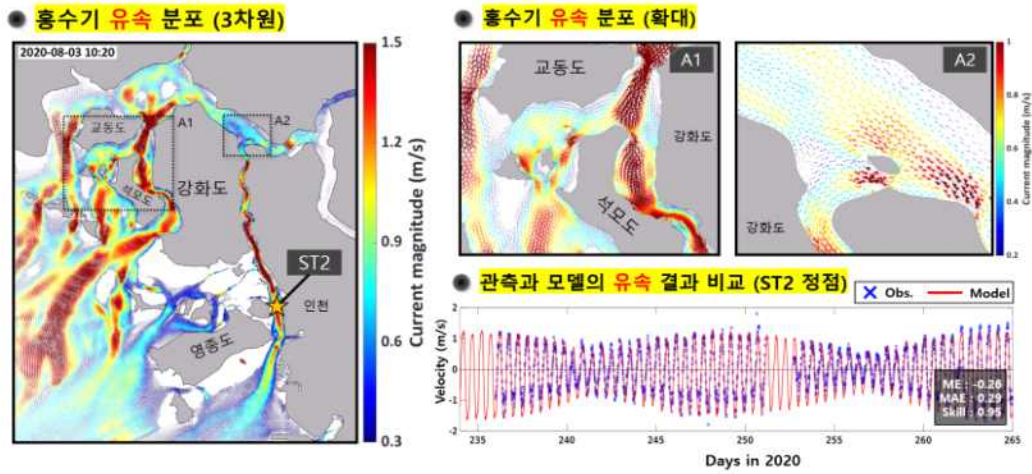


Fig. 24. The spatial distribution of current flows at the peak ebb tide during the flood season.

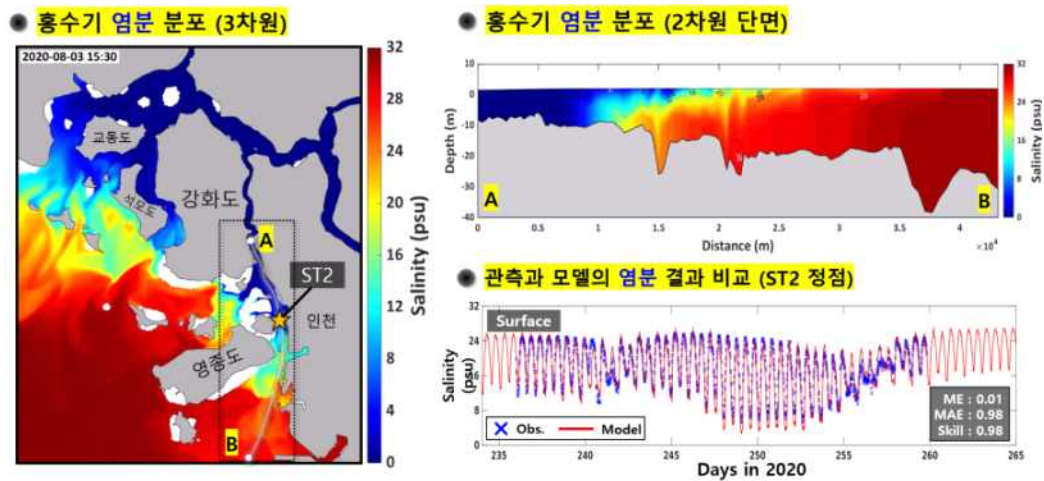


Fig. 25. The spatial pattern of salinity diffusion at the peak flood tide during the flood season.

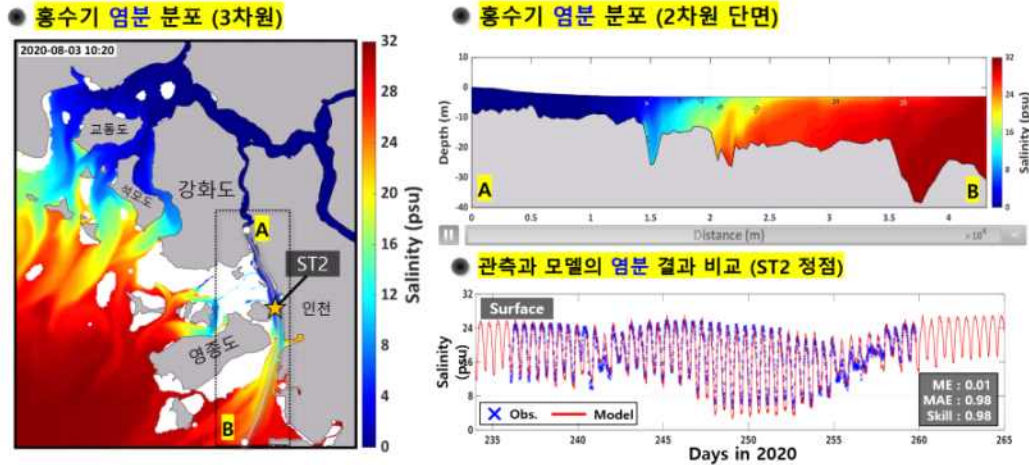


Fig. 26. The spatial pattern of salinity diffusion at the peak ebb tide during the flood season.

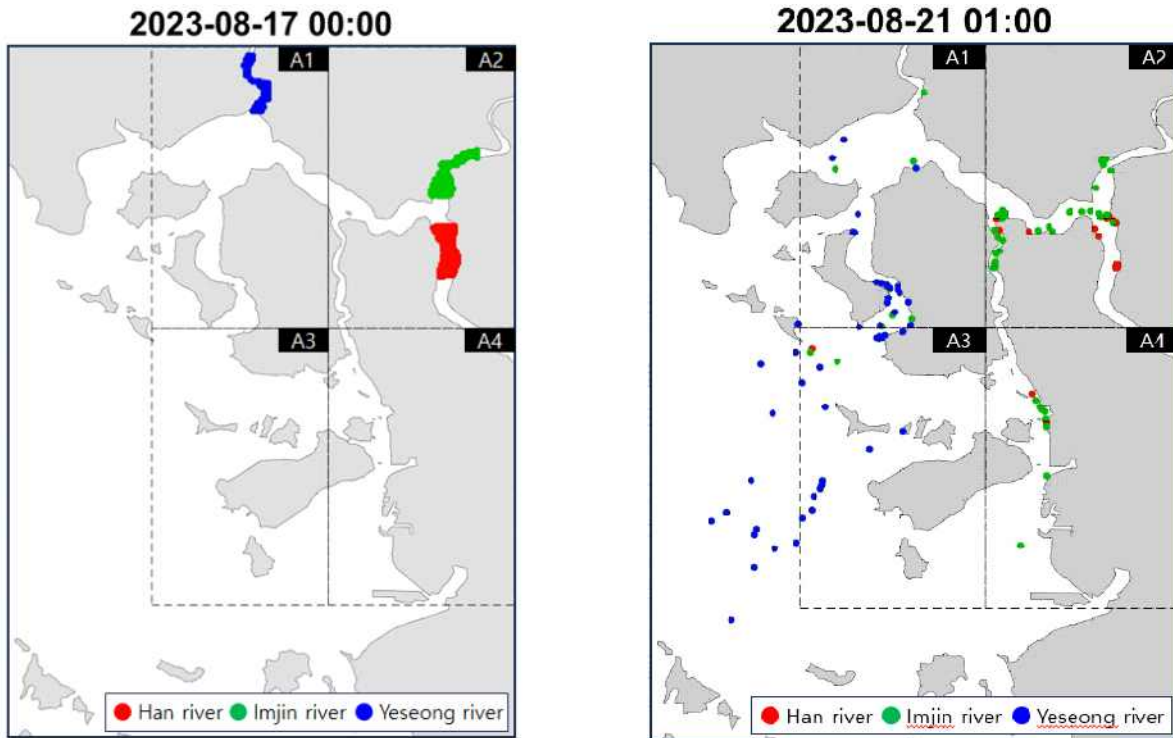


Fig. 27. Initial positions of particles. Fig. 28. Particle distribution pattern after 4 days elapsed.

3.3.2.3 입자성 물질 확산분포

한강 등 하구를 통한 인천연안의 입자성 물질 이동패턴 및 확산분포를 분석하기 위하여, 3개의 하천(한강, 임진강, 예성강)에 초기 물질 입자를 구성하였다(Fig. 27).

약 4일 경과 후, 한강과 임진강의 입자성 물질은 대부분 염하수로 인근에 집중하여 분포되었으며, 예성강 입자성 물질의 대부분은 석모수로를 통해 유출되었다. 약 8일 경과 후 한강과 임진강의 일부 입자들이 예성강 인근

으로 이동되었다. 다수의 예성강 입자들은 분석 영역 외부로 유출되었다. 약 11일 경과 후 (Fig. 28), 예성강의 입자 중 침강된 입자를 제외한 대부분의 입자들은 분석 영역 외부로 유출되었다. 유출되지 않고 경기만 내부에서 이동 중인 물질 입자의 대다수는 한강 및 임진강 기원의 입자성 물질이며, 일부 외해 기원의 물질 입자 또한 경기만 내부에서 이동 중으로 평가되었다.

IV. 결론

한강하구 육상기인 오염물질이 인천연안 해수질에 미치는 영향을 연구하기 위해 하천의 수질오염 유달부하량 산정, 인천연안 해양수질의 시공간적 수질경향 평가 및 해양수치모델을 활용한 해류순환 및 한강하구 수질오염물질의 확산을 모의하였다.

한강상류의 수질은 Ia(매우 좋음)등급으로 수도권 주민들의 식수원으로써 충분히 양호하다. 그러나 하류인 행주지점의 경우 생활하수 유입 및 산업 등의 육상기인 활동으로 인해 III(보통)등급 수준으로 수질이 저하된다. 한강하구 권역별 BOD 유달부하량은 한강 77.0 % > 임진강 21.0 % > 인천 2.0 %, 총질소의 경우 한강 79.3 % > 임진강 16.6 % > 인천 4.1 % 순으로 조사되어 대부분 한강과 임진강 권역의 영향으로 평가되었다. 가장 많은 오염 기여도를 나타낸 한강권역(행주지점)의 지난 10년(2013년 ~ 2022년)간의 수질오염물질 유달부하량의 추이는 BOD, TP, DIP, PO₄-P 및 NH₃-N 항목에서 현저한 감소경향이 있었으며, 이는 한강수계 오염총량관리제 시행 등의 효과로 평가된다.

인천연안의 2022년 해수질 조사결과, 생태기반해수수질(WQI) 등급이 평균 II등급(좋음)으로 양호하였다. I 등급은 주로 육상기인오염원의 영향이 적은 외해에 분포하였다. 수질지수 IV등급 정점(2개소) 중 S-4(오이도 서방)는 시화조력발전소, 하수처리시설, 항·포구 등 육상기인 오염물질의 영향을 많이 받는 지역이며 수질오염 주요인자는 투명도, DIN, DIP, 클로로필-a 이다. S-22(강화도 창후리 앞바다)는 한강하구에 위치하고 있으며 투명도와 DIN이 주요영향인자로 평가되었다. 지난 10년 (2013년 ~ 2022년) 인천연안의 해수질 조사결과를 바탕으로 시공간적 수질경향을 통계기법에 의해 분석한 결과 DIP, 클로로필-a, 저

층산소포화도, TOC, TN 및 TP 등 6종의 수질오염물질과 생태기반 해수수질 지수(WQI)가 개선된 것으로 평가되었다. 특히 WQI의 경우 강화 석모수로 영향 해역 10 정점과 염하수로 영향해역 5개 정점에서 통계적으로 유의한 개선이 있는 것으로 평가되었다. 한강유역 수질오염총량제 등의 육상기인 오염물질저감노력의 영향으로 한강하구의 수질이 개선된 것으로 가정한다면 영향범위를 강화도 연안 전해역(영종도 북측해역 포함)과 인천연안은 인천대교 부근까지로 추정할 수 있다.

이러한 가정의 검증을 해양순환모델을 이용하여 한강 등 하구역의 염분확산을 모의하였다. 최강 낙조 시 조류에 의해 한강 등의 담수는 염하수를 통해 인천대교 및 팔미도까지 영향을 미치며, 석모수를 통해 석모도 남측 인근과 영종도 북측까지 영향을 미칠 수 있었고, 맨-켄달 검정을 통한 공간분포결과와 유사하였다. 한강하구에서의 입자성 물질의 이동경향을 모의한 결과 한강 및 임진강에서의 입자성 물질은 대부분 염하수를 통해 유출이되며, 예성강의 입자들은 석모수를 거쳐 외해로 이동하는 것으로 평가되었다.

1980년 ~ 1990년대 한강하류는 물고기 폐죽음과 악취가 발생하는 그리 깨끗하지 곳으로 알려졌다. 그러나 2000년대 이후 정부 및 지자체의 체계적인 육상기인 오염원관리를 통해 한강하구로 유입되는 수질오염부하량은 지속적으로 감소하였다. 또한 인천의 해양환경이 정비되고 연안수질도 개선되어 2022년에는 II등급(보통) 수준으로 괄목할만한 성과를 나타내었다. 이렇듯 해양수질은 점차 개선되고 있으나, 사람에 의해 생성되고 사용된 플라스틱 등의 쓰레기는 일회용품 등의 사용의 증가로 점차 증가하고 있고 해양에 유입되어 사회문제가 되어 있다. 향후 청정한 한강하구 및 인천연안의 해양환경을 위해 미세플라스틱 및 해양쓰레기 저감 관련 연구가 지속적으로 필요 할 것으로 판단된다.

V. 사 사

본 연구는 인천광역시 보건환경연구원 해양조사과와 인하대학교 해양과학과(경기·인천 씨그랜트센터)의 공동연구 업무협약(MOU)의 일환으로 실시되었습니다.

본 연구는 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(20220051, 경기·인천씨그랜트).

본 연구는 환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축사업의 지원을 통해 실시되었습니다.

VI. 참고문헌

1. Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G. (2006a). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Special Issue entitled Advances in Computational Oceanography, *Oceanography*, 19 (1), 78-89.
2. Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G. (2006b). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model-FVCOM user manual. School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford, second ed, Technical Report SMAST/UMASSD-06-0602, 318.
3. Chen, C., Huang, H., Beardsley, R.C., Liu, H., Xu, Q., Cowles, G. (2007). A finite-volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: comparisons with finite difference models, *Journal of Geophysical Research*, 112, C03018. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JC003485>.
4. Chen, C., Liu, H. (2003). An Unstructured Grid, Finite-Volume, Three-Dimensional, Primitive Equations Ocean Model: Application to Coastal Ocean and Estuaries, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20, 159-186.
5. Chen, C., Zhu, J., Zheng, L., Ralph, E., Budd, J.W. (2004). A nonorthogonal primitive equation coastal ocean circulation model: Application to Lake Superior, *Journal of Great Lake Research*, 30, 41-54.
6. Cleveland, W.S. and Devlin, S.J. (1988). Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, *Journal of the American Statistical Association*, 83, 596-610
7. Clow, D.W. and Mast, M.A. (1999). Long-term trends in stream water precipitation chemistry at five headwater basins in the northeastern United States. *Water Resources Research*, 35(2), 541-554.
8. Cowles, G.W. (2008). Parallelization of the FVCOM coastal Ocean Model, *The international Journal of High Performance Computing Applications*. <https://doi.org/10.1177/1094342007083804>.
9. Ge, J., Chen, C., Qi, J., Ding, P., Beardsley, R.C. (2012). A dike - groyne algorithm in a terrain-following coordinate ocean model (FVCOM): Development, validation and application, *Ocean Modelling*, 47, 26-40.
10. Hirsch, R.M., Slack, J.R. and Smith, R.A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18, 107-121.
11. Jae Yoon Choi, Jong Wook Kim, Hye Min Lee, Byung Il Yoon, & Seung-Buhm Woo. (2021). Effect of Freshwater Discharge from a Water Reservoir on the Flow Circulation in the Semi-Closed Harbor,

- Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 33(1), 1-12.
12. Lee, Hye Won, & Park, Seoksoon (2008). Long-Term Trend Analyses of Water Qualities in Mangyung Watershed, Journal of Korean Society on Water Quality, , 24(4), 480-487.
 13. Mellor, G., Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem, Reviews of Geophysics, 20, 851-875.
 14. Nam, Jungho, Kang, Daeseok. (2003). Developing a Management Framework for Marine Environmental Protection from Land-based Activities in Korea, Ocean Policy Research, 18(2), 33-68.
 15. NIFS, (2024). accessed Jan 19, 2024, https://www.nifs.go.kr/red/news_2.red
 16. Park, K., Oh, J.H., Kim, H.S., Im, H.H. (2002). Case Study: Mass transport Mechanism in Kyunggi Bay around Han River Mouth, Korea.
 17. Paul, M.B. and Linfield, C.B. (1997). Statistics for Environmental Engineers, Lewis publishers.
 18. Pietrzak, J, Jakobson, JB, Burchard, H, Vested, HJ, Petersen, O. (2002). A three-dimensional hydrostatic model for coastal and ocean modelling using a generalized topography following co-ordinate system, Ocean Modelling, 4(2), 173-205.
 19. Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. Monthly Weather Review, 91, 99-164.
 20. UNEP, (2023). accessed Nov 28, 2023, <https://www.unep.org/explore-topics/oceans-seas/what-we-do/working-regional-seas/marine-pollution>.
 21. Willmott, C.J. (1981). On the validation of models, Physical Geography, 2(2), 184-194.