한국해양환경 · 에너지학회지
J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy
Vol. 22, No. 1, 47-56, February 2019

https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2019.22.1.47
ISSN 2288-0089(Print) / ISSN 2288-081X(Online)

Original Article

2013-2017년 한국연안의 생태기반 해수수질 평가 결과

박미옥[1] · 이용우[2] · 박준건[3] · 강철순[4] · 김성길[5] · 김성수[6] · 이석모[7,†]
[1]해양환경공단 해양수질팀 대리
[2]해양환경공단 해양수질팀 차장
[3]해양환경공단 해양수질팀 차장
[4]해양환경공단 해양수질팀 사원
[5]해양환경공단 해양수질팀 팀장
[6]해양환경공단 골재단지관리팀 팀장
[7]부경대학교 생태공학과 교수

Evaluation of the Seawater Quality in the Coastal Area of Korea in 2013-2017

Mi-Ok Park[1], Yong-Woo Lee[2], Jun-Kun Park[3], Cheol-Sun Kang[4], Seong-Gil Kim[5], Seong-Soo Kim[6], and Suk Mo Lee[7,†]

[1]Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan, 49111, Korea
[2]Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan, 49111, Korea
[3]Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan, 49111, Korea
[4]Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan, 49111, Korea
[5]Team Leader, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan, 49111, Korea
[6]Team Leader, Aggregate Resources Monagement Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul, 05718, Korea
[7]Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyoung National University, Busan 48513, Korea

요 약

생태기반 해수수질 기준(수질평가지수: Water Quality Index)을 적용하여 최근 5년간(2013~2017) 한국연안에서 정점별(317개) 연평균 자료로 수질을 평가한 결과, 수질 I 등급(매우좋음)과 II등급(좋음) 비율이 2014년 이후 약 70% 이상으로 점차 증가한 것으로 나타났다. 또한 해역별로 2026년까지 달성해야 할 수질목표의 달성률은 2013년(63.6%)에 비해 2017년(92.3%)에 약 30% 상승하였다. 수질평가지수는 5개의 항목별 점수를 이용하여 계산되며, 해역별 수질평가 결과는 시공간적으로 서로 다른 항목에 의해서 영향을 받는 것으로 나타났다. 서해중부생태구에서는 2월에 부영양화 원인물질(DIN, DIP)의 농도가 높게 나타났고, 이로 인해 수질 IV(나쁨), V(아주나쁨)등급의 비율이 약 56%로 높았다. 대한해협생태구에서는 8월(하계)에 주로 저층산소포화도의 영향으로 IV등급의 비율이 약 67%로 높게 나타났다. 해역별 수질 평가 결과는 수질이 점차 개선되고 있는 것으로 나타났으나, 해역별로 수질 평가 결과에 영향을 미치는 주요 요인이 다르게 나타나고 있어 해역별 수질 특성을 고려한 체계적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract – The water quality index (WQI) indicating the environmental status of the coastal area of Korea can be classified into 5 grades. As a result of the evaluation of WQI at 317 stations in the coastal area of Korea from 2013 to 2017, the proportion of I (very good) and II (good) grades have gradually increased since 2014 (>70% of total evaluation stations). Moreover, approximately 92.3% of the coastal area has reached the target seawater quality up to 2026, which has increased by more than 30% compared to 2013. The environmental factors, which cause the eutrophication, display the various characteristics both spatially and seasonally, and they have an impact on the evaluation of the WQI. In the central West Sea ecoregion, the concentrations of DIN and DIP were relatively high in February, resulted in the increase of IV (bad) and V (very bad) grades. In the Korea Strait ecoregion, the bad rate in August was expanded up to 67% due to the effect of lower dissolved oxygen satura-

†Corresponding author: leesm@pknu.ac.kr

tion in the bottom layer. Water quality in the coastal regions has been shown to be improving gradually, but the major factors affecting water quality were different for each coastal region. It is necessary to consider the water quality characteristics of each coastal region to systematically manage the marine environment.

Keywords: Marine Environmental Standard(해양환경기준), Water Quality Index (WQI, 수질평가지수), Seawater Quality(해수수질)

1. 서 론

해양환경기준은 해양생태계와 국민건강을 보호하고 적합한 해양수질을 유지하기 위한 제도적 기준이다. 우리나라의 해양환경기준은 1978년 환경보전법에서 설정하여 7번의 보완을 거치면서 점차적으로 수질항목을 확대해 왔다(MLTM[2008]). 1991년 환경정책기본법, 2008년 해양환경관리법에서 생활환경 관리를 위한 기준은 수소이온농도(pH), 화학적산소요구량(COD), 용존산소량(DO), 총질소(TN), 총인(TP) 등 7개 항목에 대한 기준뿐이었다. 또한 이 기준들은 해역별 특성을 고려하지 않고 수질을 일률적으로 3등급으로 평가하여, 동일한 지역에서 평가항목에 따라 수질등급이 다르게 나타나는 경우에 해수수질을 관리하는데 어려움이 있었다(Rho *et al*.[2012]; Ra *et al*.[2013]). 이후 2011년 해양환경기준이 전부개정 되면서 해역의 특성을 고려한 「해역별 수질등급기준」의 생태기반 해수수질 기준이 설정되었다(MLTM[2011]). 한국연안을 수심, 해류, 조석(조차), 기후 등의 특성을 고려해 생태학적 관점에서 5개의 생태구로 구분하였다. 동해생태구에서 주요 분류자는 수심과 용승, 대한해협생태구는 해류체계, 서남해역생태구는 조석혼합에 따른 탁도, 서해중부생태구는 염분과 조차, 제주생태구는 기후(아열대)가 중요한 분류자로 작용하여 해역별 특성을 고려하여 해수수질을 관리하였다(Rho *et al*.[2012]).

육상기인 오염물질은 해양의 유입 정도에 따라 해양오염에 기여하는 바가 다르며, 동일한 양의 부영양화 물질이 해양에 유입 되더라도 해역별 특성상 다른 반응이 나타나기 때문에 해역별로 해양환경을 관리하는 것이 중요하다. 또한 유해성 적조 발생 증가, 과밀양식으로 인한 연안의 자가오염이 증가되면서 체계적으로 해양환경을 관리하고자 하는 필요성이 대두되었다(MLTM[2011]). COD, TN, TP 항목으로 부영양화에 따른 해수수질을 관리하고 해양생태계를 보호하는데 한계를 극복하고자 해수의 물리, 화학, 생물학적 요소를 고려하여 생태기반 해수수질 기준이 설정되어 현재까지 운영되고 있다. 생태기반 해수수질 기준은 부영양화의 원인항목(용존무기질소, 용존무기인), 일차반응물질(클로로필 *a*, 투명도)과 이차반응물질(저층산소포화도)을 기준 평가 항목으로 선정하여 5개의 생태구별로 수질평가 기준값이 설정되어 있다. 기준값은 해역별 특성을 고려하여 과학적인 방법으로 정하였고, 개별 평가항목의 점수로부터 원인항목, 일차반응항목, 이차반응항목 순으로 가중치를 크게 하는 가중선형합산법으로 수질을 평가한다(Rho *et al*.[2012]).

정부에서는 국민의 건강을 보호하고 해양환경을 보호하기 위해 해역별 수질 기준을 설정하고, 2026년까지 해역별로 달성해야 할 수질목표를 설정하여 수질을 관리하고 있다(MOF[2018]). 다양한 과학기술 발달, 새로운 오염물질 배출로 인해 해양생태계 및 사람의 건강 보호를 위한 해양환경기준은 지속적으로 재검토 및 보완이 필요하다. 본 연구에서는 최근 5년간의 자료를 이용하여 생태기반 해수수질 기준을 적용하여 시공간적으로 해수수질을 평가하고, 2026년까지 해역별로 달성해야 할 수질목표 대비 해역별 해수수질 평가 결과와 비교하였다. 또한 한국연안에서 생태구별로 수질을 평가한 결과들을 토대로 생태기반 해수 수질기준에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사방법

해양환경측정망 운영 사업을 통해 한국연안의 26개 해역, 317개 정점에서 조사된 최근 5년간(2013~2017년, 분기별 조사: 2월, 5월, 8월, 11월) 자료들을(MOF and KOEM[2013], [2014], [2015], [2016], [2017]) 생태기반 해수수질 기준을 적용하여 수질 등급을 평가하고 2026년까지 해역별로 달성해야 할 수질목표 양상을 살펴보았다(Fig. 1). 또한 수질평가에 사용되는 항목별 시공간적 분포양상도 살펴보았다. 수질평가 항목은 5개로 부영양화 원인물질(표층 용존무기질소 농도, 표층 용존무기인 농도), 일차반응 물질(표층 클로로필 *a* 농도, 투명도)과 이차반응 물질(저층산소포화도)로 구분된다. 수질평가지수(WQI)는 생태구별로 항목별 기준값을 아래와 같이 적용하여 계산하였다.

수질평가지수 = 10 × 저층산소포화도(DO) + 6 × [(클로로필 *a* (Chl *a*) 농도 + 투명도(SD))/2] + 4 × [(용존무기질소 농도(DIN) + 용존무기인 농도(DIP))/2]

수질평가지수의 해역별 기준값 및 항목별 점수는 Table 1과 2에 나타내었다. 생태구별 항목의 점수를 이용하여 계산한 WQI는 23 이하(I 등급: 매우좋음), 24~33(II등급: 좋음), 34~46(III등급: 보통), 47~59(IV등급: 나쁨), 60 이상(V등급: 아주나쁨)으로 5단계의 등급으로 구분한다(MOF제2018-10호[2018]).

3. 결과 및 고찰

3.1 한국연안에서 항목별 시공간적 변화 양상

최근 5년간(2013~2017년) 한국연안 317개 정점에서 생태기반 해수수질 평가를 위한 항목별 DIN, DIP, 클로로필 *a*, 투명도, 저층산소포화도의 시공간적 변화 양상을 Fig. 2에 나타내었다.

계절별 표층수 중 DIN 농도는 대체로 2월(5년 평균 154.8±202.1

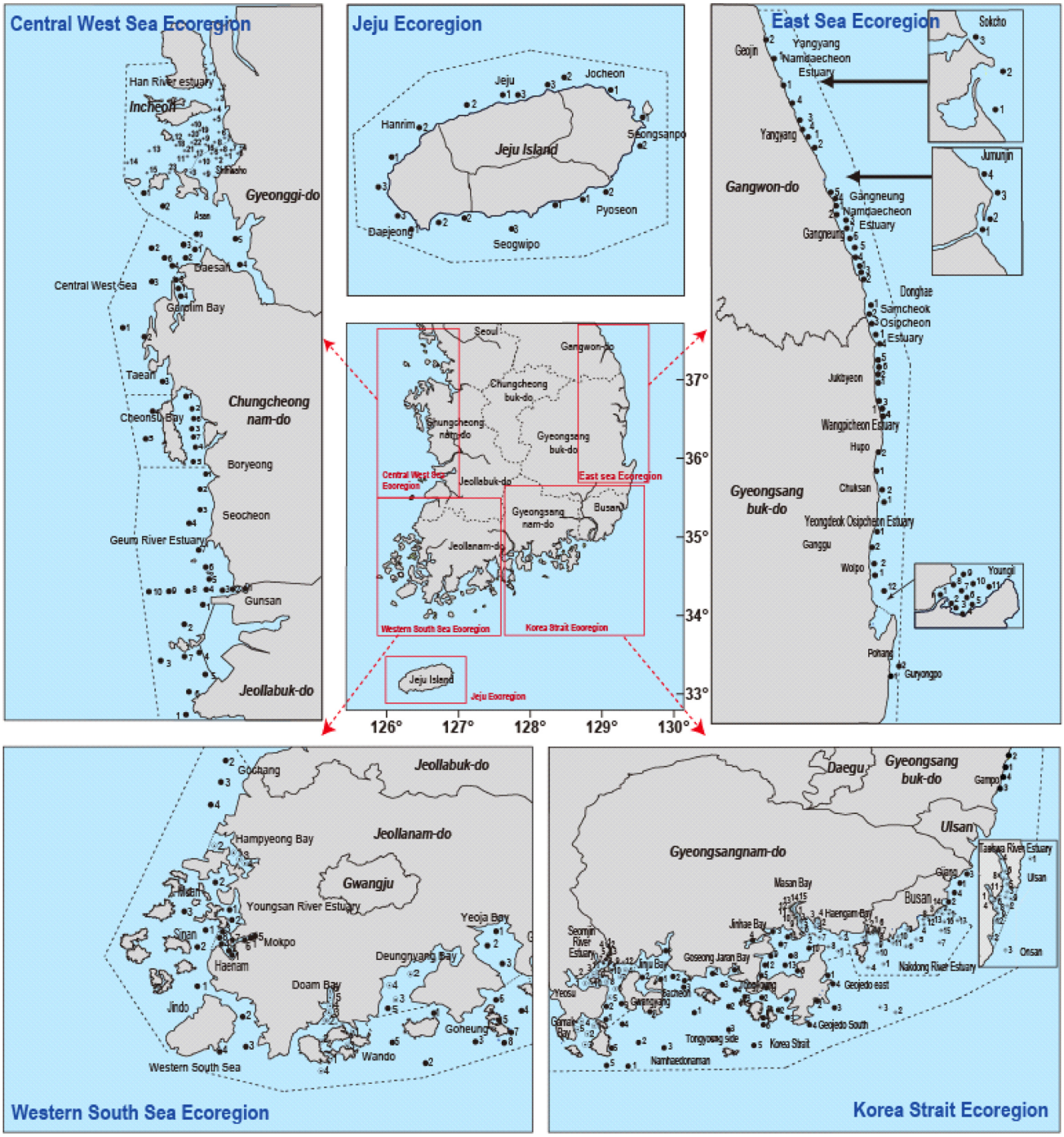

Fig. 1. A map showing the sampling locations (black circle, 317 stations) in the coastal area of Korea. The coastal area is classified into 5 ecoregions: East Sea Ecoregion (Geojin~Guryongpo), Korea Strait Ecoregion (Gampo~Gamak), western South Sea Ecoregion (Yeoja~Gochang2), central West Sea Ecoregion (Gochang1~Incheon), Jeju Ecoregion (Jeju~Hanrim).

μg L^{-1})과 11월(평균 147.3±153.1 μg L^{-1})에 다른 시기에 비해 상대적으로 높았다. 생태구별로 DIN 농도의 계절별 양상을 살펴보았을 때 서해중부생태구에서는 2월에 DIN 농도가 상대적으로 높게 나타났다. 특히 군산연안 내측(정점 1, 2)과 시화호 내측(정점 4, 5)에서 DIN 농도는 각각 285.1~1,755.2 μg L^{-1}, 151.7~2,048.1 μg L^{-1} 범위였다. 계절별 표층수 중 DIP 농도는 다른 계절에 비해 11월(평균 19.4±12.9 μg L^{-1})에 가장 높았다. 생태구별로는 서해중부생태구에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 군산연안 내측, 시화호 내측, 인천연안에서 상대적으로 DIP 농도가 높게 나타났다. 생태구별 영양염(DIN, DIP)의 분포 양상은 다른 생태구에 비해 큰 강이 존재하고 조석이 강하여 수직 혼합이 활발하게 일어나는 서해중부생태구에서 농도가 상대적으로 높았다.

Table 1. Reference values for water quality index parameters at each ecoregion

	Surface DIN (μg L^{-1})	Surface DIP (μg L^{-1})	Surface Chl *a* (μg L^{-1})	Secchi depth (m)	Bottom DO (Saturation, %)
East Sea	140	20	2.1	8.5	
Korea Strait	220	35	6.3	2.5	
western South Sea	230	25	3.7	0.5	90
central West Sea	425	30	2.2	1.0	
Jeju	165	15	1.6	8.0	

Table 2. Scores of each parameter for water quality index calculation

Score by parameter	Parameters	
	DIN (μg L^{-1}), DIP (μg L^{-1}), Chl *a* (μg L^{-1})	Secchi depth (m), DO (Saturation, %)
1	Below reference value	Above reference value
2	< reference value + 0.10 × reference value	> reference value – 0.10 × reference value
3	< reference value + 0.25 × reference value	> reference value – 0.25 × reference value
4	< reference value + 0.50 × reference value	> reference value – 0.50 × reference value
5	≥ reference value + 0.50 × reference value	≤ reference value – 0.50 × reference value

클로로필 *a* 농도는 강우량이 증가하는 8월(평균 4.5±6.3 μg L^{-1})에 상대적으로 높았으며, 특히 2013년 8월에는 서해중부생태구에서 평균 10 μg L^{-1} 이상으로 나타났다. 투명도는 2월에 동해생태구에서 평균 10 m 이상이었으며, 서남해역생태구에서 평균 약 1 m로 동일한 시기에 동해생태구에 비해 서남해역생태구에서 투명도가 10배 정도 낮았다. 황해 남동해역에서 겨울철 투명도는 해수면의 냉각과 바람에 의한 연직 혼합으로 인한 저층 퇴적물의 재부유가 활발해져 투명도가 낮게 나타난다(Choi and Kwon[1998]).

저층산소포화도는 2월에 평균 103.3%로 높았고, 8월에 평균 90.2%로 다른 시기에 비해 상대적으로 낮았다. 특히 하계에 대한해협생태구에서 77.2%로 다른 생태구에 비해 약 15% 이상 낮았다. 최근 5년간 대한해협생태구의 주요해역에서 하계에 저층산소포화도의 범위는 마산만의 경우 38.5~68.7%, 광양만은 64.2~85.5%, 부산연안에서는 74.2~91.3%, 울산연안에서는 80.5~94.1%였다. 매년 하계에 빈산소수괴가 발생하는 마산만에서 저층산소포화가 가장 낮았으며, 이로 인하여 대한해협생태구의 저층산소포화도가 다른 생태구에 비해 하계에 상대적으로 낮았던 것으로 판단된다.

마산만과 진해만에서 저층 빈산소수괴의 발생과 관련된 많은 연구가 진행되어왔다. 진해만에서 빈산소수괴는 주로 6월에 발생하여 11월에 대부분 소멸되는 것으로 알려져 있으며, 빈산소수괴는 표층 수온의 증가로 인해 강한 성층 형성이 주요 원인인 것으로 보고되었다(Kim *et al.*[2012]). 반면 마산만에서는 수온과 더불어 여름철 담수의 유입에 의한 성층 강화와 육상으로부터 유입되는 유기물, 자생기원 유기물들이 분해되는 과정에서 저층 빈산소수괴가 더욱 강화되는 것으로 알려져 있다(NFRDI[2009]; Park *et al.*[2018]). 따라서 마산만과 진해만에서 수질 개선을 위해서는 저층빈산소수괴의 발생기작을 파악하기 위한 집중 조사, 저층 용존산소 공급을 위한 다양한 기술 개발 및 빈산소수괴 발생 요인들에 대한 관리 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 한국연안 생태기반 해수수질 평가(WQI) 결과의 시공간적 변화

최근 5년간(2013~2017년) 한국연안 317개 정점에서 해수수질을 평가(WQI)하여 해역별 수질등급을 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다.

5년간 계절별 수질 등급은 2월에 수질 I(매우좋음), II등급(좋음)의 비율이 85%로 가장 높았고, 5월(78%), 11월(71%), 8월(54%) 순으로 나타났다. 수질 IV(나쁨), V등급(아주나쁨)의 비율은 8월에 23%로 가장 높았으며, 11월(9%), 5월(6%), 2월(3%) 순이었다. 한국연안은 대체로 2월과 5월에 수질의 상태가 양호하였고 8월에 수질이 상대적으로 나쁜 것으로 나타났다(Table 3).

5년동안 계절별로 수질 나쁨 이상의 정점을 생태구별 비율로 조사한 결과, 2월에는 서해중부생태구에서 수질 나쁨의 비율이 약 56%로 다른 생태구에 비해 상대적으로 높았고, 5월, 8월, 11월에는 대한해협생태구에서 각각 40%, 67%, 53%로 높은 비중을 차지하였다(Fig. 4). 생태구별 영양염의 분포양상을 살펴보면, 2월에 서해중부생태구(군산연안, 시화호, 인천연안)에서 DIN과 DIP의 농도가 상대적으로 높게 나타났으며, 이로 인하여 겨울철에 식물플랑크톤 생체량의 지시자인 클로로필 *a* 농도가 상당히 높게 나타났다. 또한 투명도가 낮게 나타나 서해중부해역에서 2월에 수질이 나빴던 것으로 판단된다.

8월에 전체 정점 중 수질 나쁨 정점이 대한해협생태구에서 약 67%로 가장 큰 비율을 차지하였으며, 주로 진해만, 광양만, 부산연안의 정점에서 나타났다. 하계에 대한해협생태구에서 수질등급을 평가하는 5개 항목 중 저층산소포화도가 가장 큰 영향을 미친 것으로 나타났다. 그 중 진해만(마산만 포함)의 대부분의 정점에서 저층 빈산소수괴 발생으로 인한 저층산소포화도의 감소로 수질 평가 결과에 나쁜 영향을 미쳤다.

동해생태구에서는 5월에 수질 IV, V등급의 비율이 약 22%로, 대부분 2017년 5월에는 영일만과 죽변연안에서 월포연안까지 수질 평가 결과가 나쁘게 나타났다. 이 시기에 봄철 식물플랑크톤의 대

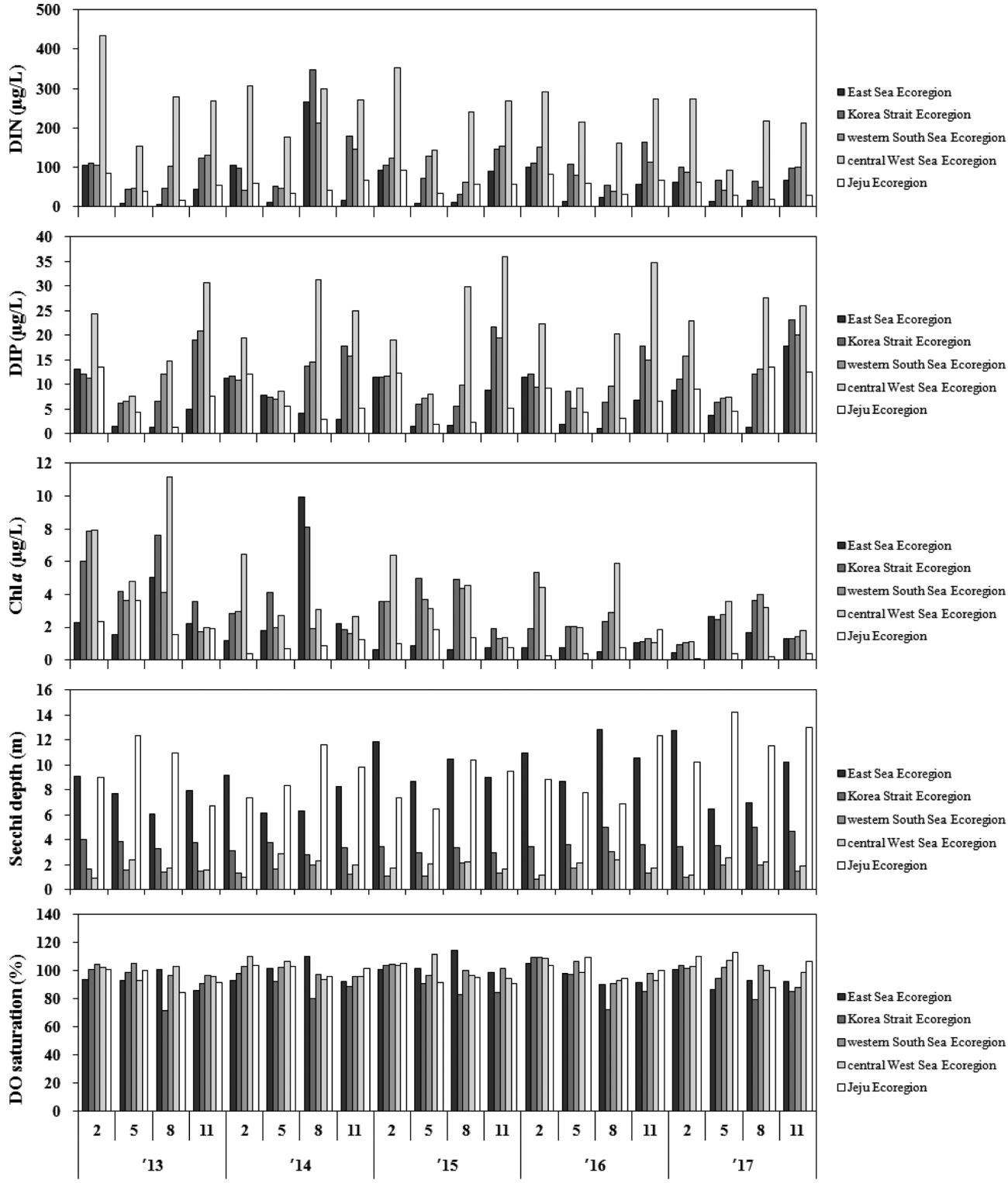

Fig. 2. Spatiotemporal distribution characteristics of water quality index parameters (DIN, DIP, Chl *a*, Secchi depth, and DO saturation) in the coastal area of Korea in 2013-2017.

번식으로 인해 클로로필 *a* 농도가 평균 4.35 μg L^{-1}로 전년대비 약 4배 높았으며, 이로 인해 투명도가 평균 4.6 m로 작년에 비해 약 1.4 m 낮았다. 또한 삼척, 축산, 강구, 영일만 일부정점에서 저층산소포화도가 80% 이하로 나타나 수질 나쁨 정점의 비율이 높았다.

수질평가지수 산출시 평가 항목 5개의 개별 점수를 이용하는데 이 중 저층산소포화도의 가중치가 가장 높고, 생태구별로 포화도의

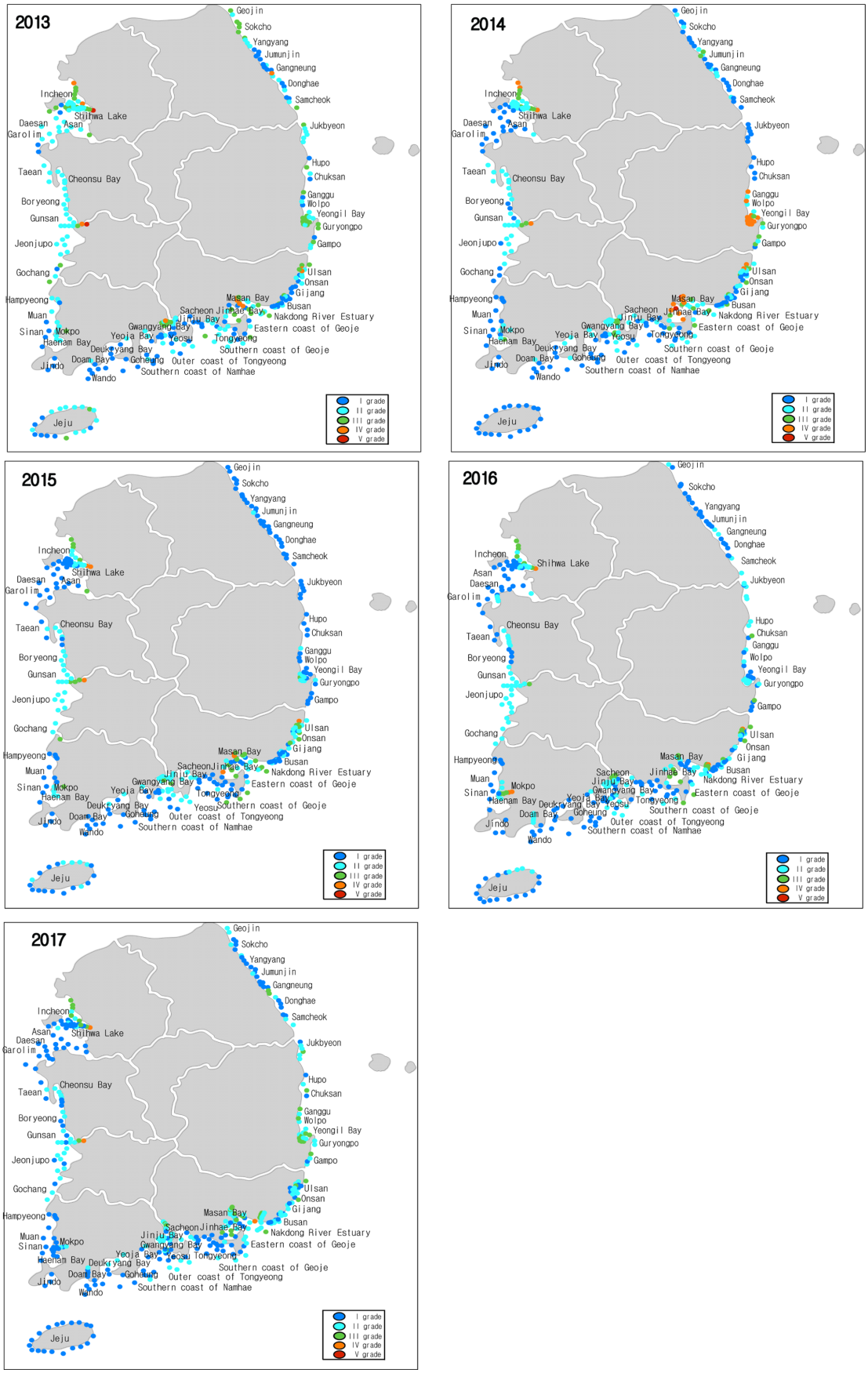

Fig. 3. Spatiotemporal distributions of water quality grade at each station in the coastal area of Korea in 2013-2017.

Table 3. The number of seawater quality grade evaluated at each station during the period of 2013~2017

Year	Month	Total	Ecological-based seawater quality grade (the number)				
			I (very good)	II (good)	III (Mode rate)	IV (bad)	V (very bad)
2013	2	317	104	121	80	11	1
	5	317	136	95	50	32	4
	8	317	32	100	82	54	49
	11	317	108	117	68	22	3
2014	2	317	124	119	50	21	3
	5	317	153	107	42	6	9
	8	317	92	86	57	53	29
	11	317	144	86	57	23	8
2015	2	317	181	103	29	4	0
	5	317	122	113	63	17	2
	8	317	122	88	58	31	18
	11	317	127	88	55	32	15
2016	2	317	187	102	28	0	0
	5	317	180	88	43	5	1
	8	317	90	78	76	50	23
	11	317	130	96	75	15	2
2017	2	317	208	92	14	2	1
	5	317	153	91	50	22	1
	8	317	84	90	89	39	15
	11	317	112	115	73	17	0
The total of five years	2	1585	804	537	201	38	5
	5	1585	744	494	248	82	17
	8	1585	420	442	362	227	134
	11	1585	621	502	328	109	28

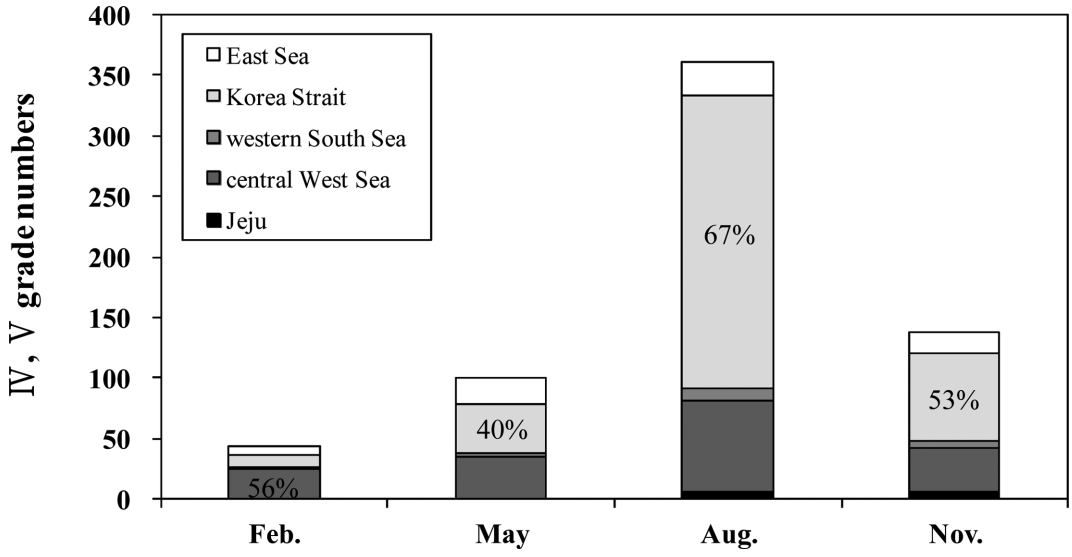

Fig. 4. Seasonally contributing ratios of water quality IV and V grades by each ecoregion of water quality grades estimated at the total stations over 2013-2017.

기준값은 동일하게 적용되고 있다. 상대적으로 수심이 깊고 연안용승이 자주 발생하는 동해연안에서는 낮은 저층 수온과 표층으로부터 저층으로 산소의 공급이 어려워 저층산소포화도가 상대적으로 낮았던 것으로 판단된다(Rho *et al*.[2012]; Park *et al*.[2017]). 또한 동해생태구의 일부해역에서는 연안용승으로 인해 표층수로 공급된 다량의 영양염은 식물플랑크톤의 생산량을 증대시켜 클로로필 *a* 농도가 상대적으로 높게 나타난다. 동해생태구의 일부정점에서 높은 클로로필 *a* 농도와 낮은 저층산소포화도로 인하여 수질이 나쁨 이

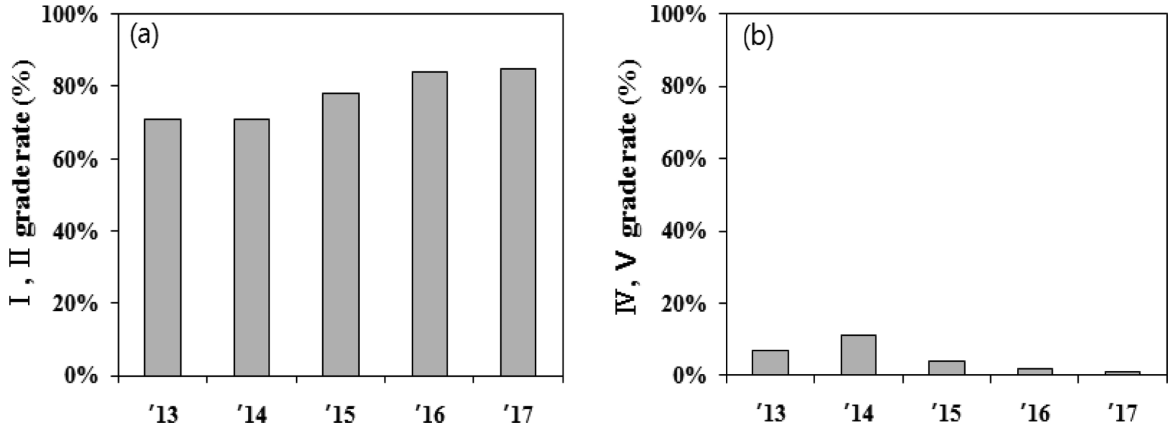

Fig. 5. The temporal changes of water quality evaluation results. The left (a) shows the proportion of 'very good and good (I+II grade)' seawater quality regions and the right (b) shows the proportion of 'bad and very bad' (IV+V grade) regions in 2013-2017.

상으로 나타났으나, 이는 주로 자연현상에 의한 결과이므로 수질오염으로 해석하기에는 무리가 있다. 따라서 동해생태구에서 수질평가 결과를 해석하는데 주의해야 할 것으로 판단된다.

서남해역생태구와 제주생태구에서는 수질 IV, V등급의 비율이 5년 동안 계절별로 5% 이하였으며, 서남해역생태구에서는 주로 8월에, 제주생태구에서는 8월과 11월에 일부정점에서 수질 IV, V등급으로 나타났다.

정점별로 연평균자료를 이용하여 해수수질 등급의 장기변화를 살펴본 결과, 최근 5년간 수질 I, II등급의 비율은 약 70% 이상으로, 2014년 이후로 좋음 이상의 비율은 점차 증가하였다. 수질 IV, V등급의 비율은 약 11% 이하였고, 2014년 이후로 나쁨의 비율 또한 점차 감소하는 경향을 보였다. 2014년에 수질 IV, V등급의 비율이 상대적으로 높았던 것은 영일만과 진해만 일대에서 수질 IV, V등급의 비율이 약 60%(총 45개 중 29개) 이상을 차지하였기 때문이다(Fig. 5).

영일만과 진해만에서 2014년 8월에 평년에 비해 상대적으로 높은 강수량(총 강수량 각각 453 mm, 666 mm)으로 인해 육상으로부터 영양염의 공급이 많았던 것으로 판단된다. 이에 따라 높은 클로로필 *a* 농도(8월 평균 40.65 μg L^{-1}, 5점), 낮은 투명도(8월 평균 1.29 m, 5점)가 수질에 나쁜 영향을 미친 것으로 판단된다. 2014년 8월에 영일만과 진해만에서 일부 정점을 제외하고 수질이 나빴던 것은 집중 강우에 의한 일시적인 현상으로 생각되지만 영일만은 형산강의 직접적인 영향을 받고 있어 육상으로부터 유입되는 오염 부하에 대한 지속적인 조사 및 관리가 필요할 것으로 판단된다. 진해만(마산만)은 외해수와의 교환이 적은 반폐쇄적인 지형적 특성을 가지고 있고, 여름철 강수량의 증가로 인한 표층수의 저염화 및 수온 상승으로 표·저층 사이에 강한 성층이 형성되어 표층수로부터 저층수로의 산소 공급이 차단되면서 저층산소포화도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 진해만(마산만)에서 수질 개선을 위해서는 저층 빈산소수괴를 발생시키는 주요 요인들에 대한 집중적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

3.3 2026년 해역별 수질목표 대비 해수수질 변동 현황

해양수산부에서 고시한 해양환경기준(MOF[2018])에 2026년까지 해역별로 달성해야 할 수질목표를 제시하고 있다. 최근 5년간(2013~2017년) 한국연안의 22개 해역에서 수질을 평가한 결과, 2026년까지 달성해야 할 해역별 수질목표 대비 2013년에 목표 달성 해역은 63.6%에서 2017년 92.3%로 약 30% 상승하였다(Table 4).

최근 5년간 수질 목표 대비 미달성 해역은 대부분 만이나 하구였으며, 2번 이상 미달성된 해역은 도암만, 진해만, 영일만, 영산강하구, 섬진강하구, 낙동강하구, 태화강하구였다. 도암만의 경우 2013년과 2016년에 수질 II등급 수준이었으며, 연평균 클로로필 *a* 농도가 4.37 μg L^{-1} 이상(WQI 항목별 점수 3점)으로 수질 등급에 영향을 미친 것으로 보인다. Yang *et al*.[2014]은 좁은 만으로 이루어진 도암만에 사내호의 담수가 유입되었을 때 식물플랑크톤의 생체량, 종조성 등에 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 여름철에 적조가 빈번하게 발생하는 해역(국립수산과학원 적조정보시스템, http://nifs.go.kr/red/main.red)으로 알려져 있다. 서남해역생태구에 포함되어 있는 도암만은 클로로필 *a* 농도가 3.7 μg L^{-1} 이하일 때 1점이 부여된다(Table 2). 환경보전해역인 도암만은 2026년까지 수질목표 I 등급을 달성하기 위해서는 사내호로부터 유입되는 담수의 수질에 대한 관리가 우선적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

진해만은 2013년과 2014년에 각각 수질 III등급 수준으로 수질목표 달성(II등급) 등급보다 높았다. 이 시기에 클로로필 *a* 농도는 연평균 8.86 μg L^{-1} 이상으로, 대한해협생태구의 클로로필 *a* 기준농도(6.3 μg L^{-1}, 1점) 보다 높았다. 또한 저층산소포화도는 87~88% 범위로 기준값(90%, 1점) 이하로 2점을 부여 받아 수질 등급이 보통이었던 것으로 나타났다.

동해생태구에 위치한 영일만의 클로로필 *a* 농도 기준값은 2.1 μg L^{-1} 이하일 때 1점이 부여되는데 미달성 시기(2103년, 2014년, 2017년)에 클로로필 *a* 농도는 연평균 2.40~13.62 μg L^{-1}였다. 식물플랑크톤의 생산량 증가로 인해 투명도 또한 기준값(8.5 m, 1점) 이하로 나타나(연평균 3.47~5.96 m) 수질 평가 결과에 영향을 미쳤다. 또

Table 4. Seawater quality objectives to achieve by coastal area by 2026 and water quality evaluated in each coastal area from 2013 to 2017

Coastal area name (31)	Target grade	Year				
		2013	2014	2015	2016	2017
Han River Estuary	II	II	II	III	II	I
Garolim Bay	II	II	I	I	II	I
Cheonsu Bay	II	II	II	II	II	II
Geum River Estuary	II	II	II	II	II	II
Hampyeong Bay	I	II	I	I	I	I
Youngsan River Estuary	II	II	II	III	III	I
Doam Bay	I	II	I	I	II	I
Deukryang Bay	I	I	I	I	I	I
Yeoja Bay	II	II	II	II	I	II
Gamak Bay	I	I	I	I	I	I
Seomjin River Estuary	I	I	II	II	II	I
Jinju Bay	II	I	II	II	II	II
Jinhae Bay	II	III	III	II	I	I
Nakdong River Estuary	I	I	II	II	II	II
Teahwa River Estuary	I	I	II	II	I	I
Yeongil Bay	II	III	IV	II	II	III
Yeongdeck Osipcheon Estuary	II	III	IV	II	II	II
Wangpicheon Estuary	II	-	-	-	-	II
Samcheok Osipcheon Estuary	II	-	-	-	-	II
Gangneung Namdeacheon Estuary	II	-	-	-	-	II
Yangyang Namdaecheon Estuary	II	-	-	-	-	I
central West Sea	II	II	I	I	I	I
western South Sea	I	I	I	I	I	I
Korea Strait Sea	I	II	I	I	I	I
East Sea	I	II	I	I	I	I
Jeju Sea	I	II	I	I	I	I
central West Offshore	I	-	-	-	-	
western South Offshore	I	-	-	-	-	
Jeju Offshore	I	-	-	-	-	
Korea Strait Offshore	I	-	-	-	-	
East Offshore	I	-	-	-	-	

한 예년 대비 강우량(453 mm 이상)이 많았던 2014년에는 DIN 농도가 약 381 μg L^{-1}로 평년 농도에 비해 약 3배 이상 높게 나타났다.

영산강하구, 섬진강하구, 낙동강하구, 태화강하구에서는 DIN 농도가 200~391 μg L^{-1}로 다른 해역에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 영산강하구는 클로로필 *a* 농도 역시 5.52~6.13 μg L^{-1}로 높아 수질평가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 섬진강하구는 DIN 농도 뿐만 아니라 투명도가 연평균 1.80~2.12 m로 상대적으로 낮게 나타났다. 섬진강하구는 수심이 얕고 담수와 해수가 만나서 혼합되는 전형적인 저탁도 하구로 알려져 있다(Kwon *et al.*[2004]). 생태기반 해수수질 기준은 대분류의 5개의 생태구로 구분하여 해역별 생태특성을 고려하여 설정되어 있어 하구역에서 추정된 수질평가결과는 지역적 특성을 고려한 해석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

최근 5년간(2013~2017) 한국연안 317개 정점에서 해수수질을 평가한 결과, 수질 I, II등급의 비율이 약 70% 이상, 수질 IV, V등급 비율은 약 11% 이내로 수질의 상태가 점차 좋아지고 있는 것으로 나타났다. 또한, 2026년까지 달성해야 할 해역별 수질목표 달성률은 2013년 63.6%에서 2017년 92.3%로 약 30% 상승한 것으로 나타났다. 생태구별로 해수수질에 영향을 미치는 요인은 다양하게 나타났다. 서해중부생태구에서는 다른 계절에 비해 2월에 표층에서 부영양화 원인물질(DIN, DIP) 농도가 높았고, 이로 인해 수질 IV, V등급의 비율이 약 56%로 동계에 가장 높았다. 대한해협생태구에서는 8월(하계)에 저층산소포화도의 영향으로 수질 IV, V등급의 비율이 약 67%로 가장 높았다. 수질평가지수(WQI)를 산정하는 5개의 항목 중 저층산소포화도의 가중치가 가장 높고, 생태구별로 산소포화도의 기준값이 동일하게 적용되고 있다. 수심이 깊은 동해연안에서는 오염의 영향보다는 자연적인 현상(낮은 저층산소포화도)에 의해 수질평가결과에 영향을 미치고 있는 것으로 보여 결과를 해석할 때 주의를 요하며, 향후 생태기반 해수수질 기준 개정시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 해양환경측정망 운영사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 현장조사 및 분석에 도움을 주신 해양수질 팀원들께 감사드립니다.

References

[1] 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.

[2] Kim, S.Y., Lee, Y.H., Kim, Y.S., Shim, J.H., Ye, M.J., Jeon, J.W., Hwang, J.R. and Jun, S.H., 2012, Characteristics of Marine Environmental in the Hypoxia Season at Jinhae Bay in 2010, Korean J. Nature Conser., 6(2), 115-129.

[3] Kwon, K.Y., Moon, C.H., Lee, J.S., Yang, S.R., Park, M.O. and Lee, P.Y., 2004, Estuarine Behavior and Flux of Nutrients in the Seomjin River Estuary, J. Korean Soc. Oceanogr., 9(4), 153-163.

[4] MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) Marine Environment Standards, 2011, 2011-344.

[5] MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2008, A Prior Study on Establishment of Marine Environmental Standards, 1-129.

[6] MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, A Study on Establishment and Improvement of Marine Environmental Standards (4), 108-163.

[7] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) Marine Environment Standards, 2018, 2018-10.

[8] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2013, Annual Report on Marine Environment Monitoring in Korea 2013.

[9] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2014, Annual Report on Marine Environment Monitoring in Korea 2014.

[10] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2015, Annual Report on Marine Environment Monitoring in Korea 2015.

[11] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2016, Annual Report on Marine Environment Monitoring in Korea 2016.

[12] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries) and KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2017, Annual Report on Marine Environment Monitoring in Korea 2017.

[13] NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute), 2009, Hypoxia in the Coast of Korea, 3-68.

[14] Park, M.O., Lee, Y.W., Park, J.K., Kim, S.G., Kim, S.S. and Lee, S.M., 2018, Changes in Water Quality in Masan Bay after the Introduction of the Total Pollution Load Management System, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(2), 139-148.

[15] Ra, K.T., Kim, J.K., Kim, E.S., Kim, K.T., Lee, J.M., Kim, S.K., Kim, E.Y., Lee, S.Y. and Park, E.J., 2013, Evaluation of Spatial and Temporal Variations of Water Quality in Lake Shihwa and Outer Sea by using Water Quality Index in Korea: A Case Study of Influence of Tidal Power Plant Operation, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 16(2), 102-114.

[16] Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.R., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y. and Kim, S.S., 2012, Reference Values and Water Quality Assessment based on the Regional Environmental Characteristics, J. Korean Soc. Oceanogr., 17(2), 45-58.

[17] Yang, E.R., Jeong, B.K., Lee, E.J., Ryu, D.K. and Sin, Y.S., 2014, Size and Species Composition of Phytoplankton related to Anthropogenic Environmental Changes in Doam Bay, J. of Environ. Interna., 23(6), 1183-1197.

Received 17 January 2019
Revised 20 February 2019
Accepted 22 February 2019