

진해만의 장기 수질변동 특성

권정노¹ · 이장호^{2,†} · 김영숙³ · 임재현³ · 최태준³ · 예미주³ · 전지원³ · 김슬민³

^{1,3}국립수산과학원 어장환경과
²국립환경과학원 자연환경연구과

Long-Term Variations of Water Quality in Jinhae Bay

Jung-No Kwon¹, Jangho Lee^{2,†}, Youngsug Kim³, Jae-Hyun Lim³, Tae-Jun Choi³, Mi-Ju Ye³,
Ji-Won Jun³ and Seulmin Kim³

^{1,3}Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea
²Natural Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-708, Korea

요 약

마산만, 행암만, 고현만, 원문만, 진동만 등을 포함하는 진해만 해역의 장기적 수질변동 특성을 파악하기 위하여 2000년부터 2012년까지 진해만 해역 내 9개 조사 정점에서 수질 모니터링을 실시하였다. 유기물 오염 지표인 화학적산소요구량(COD)과 부영양화와 관련이 많은 영양염류(DIN, DIP) 및 클로로필 *a* (Chl.-*a*)의 평균농도는 육상 유역으로부터의 오염부하가 큰 마산만이 대체로 높았다. 특히, 마산만의 가장 안쪽에 위치한 st.1 정점은 육상 오염원에 인접해 있고, 해수의 유동이 원활치 않은 특성 등으로 인해 가장 높은 농도를 나타냈다. 이러한 특성은 요인분석에서도 확인되었는데, 마산만 st.1 정점은 표층수와 저층수 모두 유기물과 영양염류 증가 요인에 대한 영향이 주된 특징으로 나타났다. 진해만 외해 경계부 정점(st.5)과 고현만(st.6), 원문만(st.7), 당항만(st.8), 진동만(st.9) 정점들은 표층수와 저층수 모두에서 유기물과 영양염류의 증가 요인에 대한 영향이 마산만(st.1, st.2, st.3)이나 행암만(st.4) 정점에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 진해만 해역 수질의 장기변동 특성을 살핀 결과, 표층 COD 농도는 뚜렷한 감소경향이 없었지만, 저층 COD 농도는 마산만 st.1 정점을 제외한 나머지 8개 정점에서 뚜렷한 감소추세를 보였다. 그리고 영양염류(DIN, DIP) 농도의 경우, 표층과 저층 모두 그리고 9개 정점 모두에서 두드러진 감소추세를 나타냈다. 마산만에서의 감소추세는 특별관리 해역 지정 이후 시행된 오염총량제 등이 수질 개선에 영향을 준 것으로 판단되며, 이와 더불어 진해만 해역이 전반적으로 함께 영향을 받은 것으로 여겨진다.

Abstract – In order to reveal the long-term variations of water quality in Jinhae Bay, water qualities had been monitored at 9 survey stations of Jinhae Bay during 2000~2012. The surface and bottom waters concentrations of chemical oxygen demand (COD), dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and chlorophyll-*a* (Chl.-*a*) were higher at the survey stations of Masan Bay than the stations of other Bays. Especially, station 1 which is located at the inner area of Masan Bay had the highest values in the concentrations of COD, DIN, and Chl.-*a* because there were terrestrial pollutant sources near the station 1 and sea current had not well circulated in the inner area of Masan Bay. In factor analysis, the station 1 also had the highest factor values related to factors which increase organic matters and nutrients in surface and bottom waters of Masan Bay. However, the stations (st.5, st.6, st.7, st.8, and st.9) of other Bays had lower values of the factors. In time series analysis, the COD concentrations of the bottom waters at 8 stations except for station 1 distinctly decreased. However, the COD concentrations of the surface waters showed no distinct decrease trends at all stations. In the concentrations of nutrients (DIN and DIP) of both surface and bottom waters, there were tremendous decrease trends at all stations. Therefore, these distinct decrease trends of the COD in bottom waters and the nutrients in surface and bottom waters of Jinhae Bay could have been associated with water improvement actions such as TPLMS (total pollution load management system).

Keywords: Jinhae Bay(진해만), Chemical Oxygen Demand(화학적산소요구량), Nutrients(영양염류), Long-term Variations of Water Quality(장기 수질변동)

[†]Corresponding author: ficedula01@korea.kr

1. 서론

진해만 해역은 마산만, 행암만, 고현만, 원문만, 당항만, 진동만 등의 여러 만(灣)들을 포함하고 있고, 거제도 동북쪽 해역에서 외해와 주로 연결되나 외해수의 유입이 약하여 반폐쇄성 해역에 속한다. 특히, 진해만 해역 내 마산만은 1970년 대 이후 주변 유역의 도시화 및 산업화가 집중적으로 이루어지면서 해양환경이 지속적으로 악화되어 왔다(Cho and Chae[1998]). 이에 마산만은 2000년에 해양오염방지법에 근거하여 연안육지부를 포함한 특별관리해역으로 지정되었다. 이후 해수 수질의 종합적 관리를 위해 2007년에 화학적산소요구량(COD)에 대한 1단계 오염총량제가 시행되었고, 2012년부터 질소와 인을 추가하여 2단계 오염총량제가 시행 중이다. 또한 이러한 정책 시행과 더불어 해수 수질 특성이나 수질관리에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔다.

이들 연구는 주로 특별관리해역인 마산만에 집중되어 이루어졌는데, 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 하나는 수질 모델링에 기반한 연구로서 마산만 수질변동예측을 위해 체류시간, 이송-혼합-확산 등의 물리적 요인에 대한 모의가 진행된 바 있다(Kim and Lee[2011]; Yoo et al.[2008a; 2008b]). 그리고 수질변동 예측을 위한 모델연구(Kim and Lee[2000]; Hong et al.[2007]; Lee and Moon[2007]),

하수처리장 건설에 따른 수질변동개선 효과 모델연구(Cho et al.[2000]; Oh et al.[2005]), 유입하천 등 오염원의 부하 특성 연구(Cho and Chae[1998]; Kim et al.[2009]; Lee[2006]; Lee et al.[1998]; Lee and Park[2003]) 등이 진행되었다. 다음으로 현장 모니터링 중심의 연구가 진행되었는데, 식물플랑크톤 군집분포 특성과 환경요인과의 관계 연구(Baek and Kim[2010]; Hyun et al.[2011]; Lee and Han[2007]; Sohn et al.[2000]; Son et al.[2014]), 마산만 수질변동 현장 모니터링 연구(Chang et al.[2012]; Cho et al.[1998]; Choi et al.[2007]; Jeong et al.[2013]; Jung et al.[2011]; Lee et al.[1996]; Lim et al.[2007]; Kim et al.[2012]; Shin et al.[2004]) 등이 진행되었다.

마산만은 특별관리해역으로서 주요 관심지역은 분명하나 진해만 해역 내 여러 만(灣)들도 마산만의 수질관리 정책시행에 간접적으로 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 반폐쇄성 내만에 속하는 이들 지역을 함께 모니터링하고 수질변동 특성을 비교 검토하는 작업은 향후 진해만 해역의 해양 환경관리에 필요한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 마산만을 포함하는 진해만 해역 전체를 대상으로 한 모니터링은 Yoon and Lee[2004]에 의해 1989년~1994년에 수행된 바 있다. 이에 본 연구에서는 마산만을 포함하는 진해만 해역을 대상으로 마산만 특별관리해역 지정 이후 최근 10여 년 동안의 장기 모니터링 결과를 중심으로 수질 변동 특성을 파악하였다.

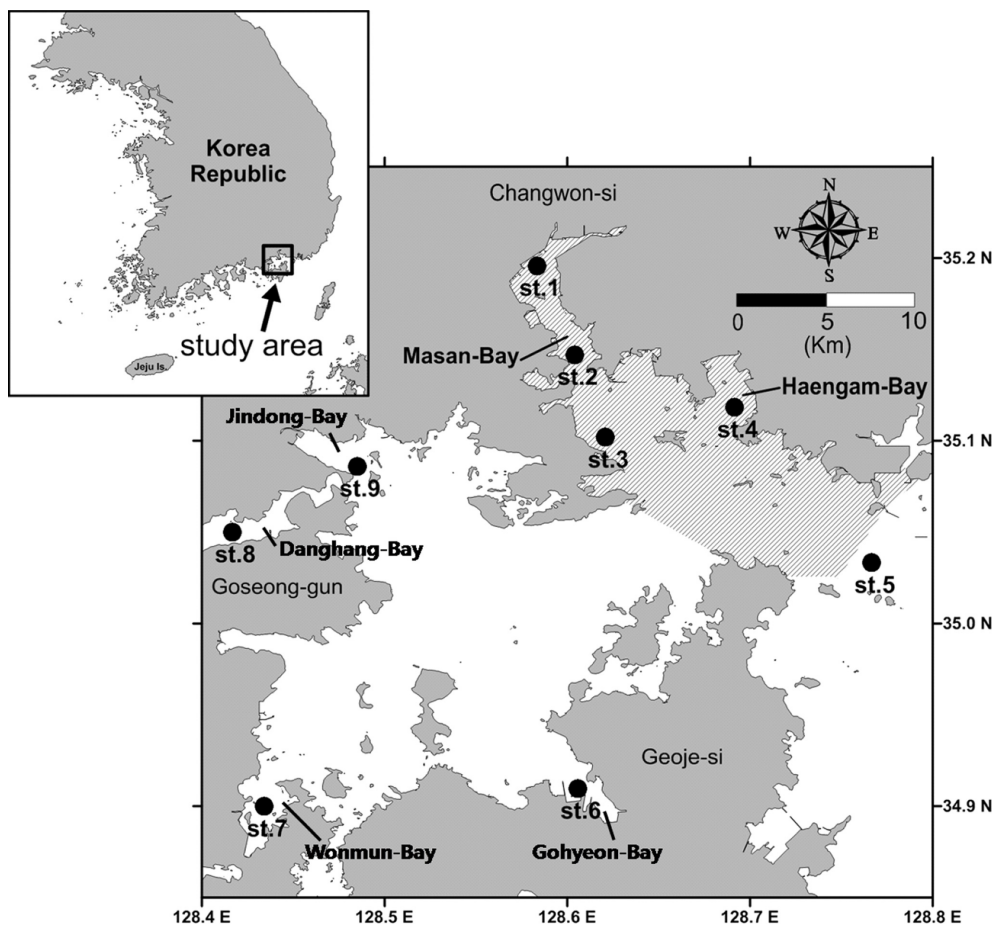


Fig. 1. The location of monitoring stations (□: special management coastal area).

2. 연구 방법

본 연구는 2000년부터 2012년까지 마산만 3개 정점(st.1~st.3), 행암만(st.4), 고현만(st.6), 원문만(st.7), 당항만(st.8), 진동만(st.9), 진해만 외해 경계부(st.5) 정점을 대상으로 수행되었다(Fig. 1).

매년 2월, 5월, 8월, 11월을 기준으로 1회씩 현장관측 및 채수를 실시하였다. 수질분석은 해양환경공정시험방법(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs[2010])에 따라 측정하였다. 수온, 염분, 수소이온농도지수(pH), 용존산소(DO)는 관측장비(YSI 6600)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 채수는 니스킨 채수기를 사용하였고, 채수기는 현장 해수로 3회 이상 세척하였다. 채수 수심은 수면 아래 1 m 지점에서 표층 해수를 채수하였고, 바닥으로부터 2 m 상부 수층에서 저층 해수를 채수하였다. 화학적산소요구량(COD)은 알칼리성 과망간산칼륨법으로 측정하였다. 용존무기질소(DIN)는 암모니아질소(Indophenol 청색법), 아질산질소(α -NED법), 질산질소(Cu-Cd 칼럼을 이용한 아질산질소 환원법)를 개별적으로 분석한 후 이들의 합으로 구하였다. 용존무기인(DIP)은 ascorbic acid를 이용한 몰리브덴청법으로 분석하였고, 부유물질(SS)은 GF/F 여과 및 건조 후 무게를 측정하여 구하였으며, 클로로필-*a* (Chl.-*a*)는 membrane filter에 여과 후 acetone으로 추출하여 분광광도계로 측정하였다. 자료의 해석을 위해 통계프로그램(SPSS ver. 12.0)을 이용하여 평균(mean) \pm 표준오차(standard error) 등의 기술통계를 구하였고, 수질항목간의 상호관계를 파악하기 위해 상관분석 및 요인분석을 실시하였다. 그리고 수질의 장기변동 특성을 파악하기 위해 회귀분석을 실시하였는데, 연속된 4개씩의 자료로부터 이동평균값을 산출하여 증감 추세를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 특성

Table 1은 진해만 해역 내 조사정점의 13년간('00년~'12년) 수질 항목별 평균값을 나타낸 것이다. 표층 수온은 진동만에 속하는 st.9 정점이 평균 16.66 °C로 가장 높았고, 마산만에 속하는 st.2 정점이 15.93 °C로 가장 낮았다. 저층 수온은 당항만의 st.8 정점이 15.07 °C로 가장 높았고, 마산만 st.2 정점과 고현만 st.6과 진동만 st.9 정점이 14.04 °C로 가장 낮았다. 염분은 만 바깥쪽 외해부에 인접한 st.5 정점이 표층 31.92 psu, 저층 33.19 psu로 가장 높았고, 당항만 st.8 정점이 표층 29.26 psu, 마산만 st.1 정점이 저층 31.63 psu로 가장 낮았다. 수소이온농도(pH)는 행암만 st.4 정점이 표층 8.18, 저층 8.07로 가장 높았고, 당항만 st.8 정점이 표층 8.04, 고현만 st.6과 원문만 st.7 정점이 저층 7.95로 가장 낮았다. 용존산소(DO)는 행암만 st.4 정점이 표층 10.17 mg/L, 저층 8.58 mg/L로 가장 높았고, 진동만 st.9 정점이 표층 8.71 mg/L, 마산만 st.2 정점이 저층 6.88 mg/L로 가장 낮았다. 부유물질(SS)은 마산만 st.1 정점이 8.83 mg/L로 가장 높았고, 원문만 st.7 정점이 4.36 mg/L로 가장 낮았다.

유기물 오염 지표인 화학적산소요구량(COD)과 부영양화와 관련이 많은 영양염류(DIN, DIP) 및 클로로필 *a*(Chl.-*a*)는 마산만 st.1~st.3 정점과 행암만 st.4 정점에서 대체로 높은 범위를 나타냈고, 나머지 정점(st.5~st.9)에서는 상대적으로 낮은 범위를 나타냈다. COD는 마산-행암만 정점 st.1~st.4에서 표층 평균값 범위가 2.34~3.19 mg/L, 저층 1.92~2.71 mg/L를 나타냈고, 나머지 정점(st.5~st.9)에서는 표층 평균값 범위 1.71~2.23 mg/L, 저층 1.33~1.97 mg/L를 나타냈다. COD 최고값은 표층(3.19 mg/L), 저층(2.71 mg/L) 모두 마산만 st.1 정점에서 나타났다. 용존무기질소(DIN)는 마산-행암만 정

Table 1. Mean and standard error of water quality in each survey station during 2000~2012

		st.1	st.2	st.3	st.4	st.5	st.6	st.7	st.8	st.9
Temp. (°C)	s	16.13 \pm 0.21	15.93 \pm 0.19	16.20 \pm 0.12	16.38 \pm 0.15	16.51 \pm 0.12	16.13 \pm 0.19	16.56 \pm 0.22	16.48 \pm 0.24	16.66 \pm 0.20
	b	14.75 \pm 0.11	14.04 \pm 0.11	14.29 \pm 0.15	14.88 \pm 0.14	14.39 \pm 0.21	14.04 \pm 0.17	14.45 \pm 0.16	15.07 \pm 0.16	14.04 \pm 0.16
Salinity (psu)	s	29.56 \pm 0.63	30.49 \pm 0.45	31.19 \pm 0.30	31.42 \pm 0.26	31.92 \pm 0.27	31.25 \pm 0.31	31.13 \pm 0.31	29.26 \pm 0.72	30.45 \pm 0.47
	b	31.63 \pm 0.17	32.51 \pm 0.10	32.53 \pm 0.12	32.44 \pm 0.15	33.19 \pm 0.13	32.47 \pm 0.16	32.57 \pm 0.10	31.66 \pm 0.12	32.52 \pm 0.10
pH	s	8.06 \pm 0.06	8.14 \pm 0.03	8.15 \pm 0.03	8.18 \pm 0.03	8.11 \pm 0.03	8.10 \pm 0.02	8.06 \pm 0.03	8.04 \pm 0.03	8.09 \pm 0.03
	b	7.96 \pm 0.04	7.97 \pm 0.02	8.03 \pm 0.02	8.07 \pm 0.02	8.03 \pm 0.02	7.95 \pm 0.02	7.95 \pm 0.03	7.97 \pm 0.02	7.96 \pm 0.02
DO (mg/L)	s	8.98 \pm 0.38	9.17 \pm 0.30	9.46 \pm 0.34	10.17 \pm 0.41	8.86 \pm 0.25	9.12 \pm 0.32	8.92 \pm 0.24	8.74 \pm 0.29	8.71 \pm 0.25
	b	7.33 \pm 0.40	6.88 \pm 0.29	8.02 \pm 0.28	8.58 \pm 0.34	8.01 \pm 0.19	7.00 \pm 0.27	7.44 \pm 0.30	7.57 \pm 0.20	7.16 \pm 0.15
COD (mg/L)	s	3.19 \pm 0.12	2.57 \pm 0.07	2.34 \pm 0.16	2.47 \pm 0.10	1.71 \pm 0.18	2.23 \pm 0.13	1.89 \pm 0.13	2.23 \pm 0.13	2.05 \pm 0.15
	b	2.71 \pm 0.10	1.92 \pm 0.11	2.03 \pm 0.15	2.26 \pm 0.13	1.33 \pm 0.12	1.82 \pm 0.13	1.77 \pm 0.13	1.97 \pm 0.12	1.65 \pm 0.11
DIN (mg/L)	s	0.391 \pm 0.079	0.240 \pm 0.056	0.194 \pm 0.034	0.198 \pm 0.058	0.106 \pm 0.011	0.115 \pm 0.024	0.091 \pm 0.018	0.160 \pm 0.032	0.157 \pm 0.026
	b	0.326 \pm 0.060	0.254 \pm 0.045	0.199 \pm 0.035	0.173 \pm 0.042	0.128 \pm 0.010	0.134 \pm 0.019	0.104 \pm 0.019	0.156 \pm 0.023	0.131 \pm 0.018
DIP (mg/L)	s	0.054 \pm 0.015	0.041 \pm 0.011	0.034 \pm 0.010	0.056 \pm 0.018	0.020 \pm 0.004	0.026 \pm 0.007	0.018 \pm 0.003	0.024 \pm 0.003	0.021 \pm 0.004
	b	0.053 \pm 0.014	0.049 \pm 0.010	0.035 \pm 0.007	0.047 \pm 0.014	0.023 \pm 0.004	0.027 \pm 0.004	0.023 \pm 0.004	0.027 \pm 0.004	0.027 \pm 0.003
SS (mg/L)	s	8.83 \pm 0.86	7.02 \pm 0.88	5.37 \pm 0.30	7.02 \pm 0.75	6.44 \pm 0.67	6.13 \pm 1.36	4.36 \pm 0.45	8.01 \pm 0.74	6.86 \pm 1.06
Chl.- <i>a</i> (μ g/L)	s	15.86 \pm 2.03	10.08 \pm 1.05	8.17 \pm 0.81	9.31 \pm 0.84	5.46 \pm 0.63	5.46 \pm 0.70	4.70 \pm 0.72	7.21 \pm 0.92	4.99 \pm 0.65

s: surface water; b: bottom water.

점 st.1~st.4에서 표층 평균값 범위가 0.194~0.391 mg/L, 저층 0.173~0.326 mg/L를 나타냈고, 나머지 정점(st.5~st.9)에서는 표층 평균값 범위 0.091~0.160 mg/L, 저층 0.104~0.156 mg/L를 나타냈다. DIN 최고값은 표층(0.391 mg/L), 저층(0.326 mg/L) 모두 마산만 st.1 정점에서 나타났다. DIP는 마산·행암만 정점 st.1~st.4에서 표층 평균값 범위가 0.034~0.056 mg/L, 저층 0.035~0.053 mg/L를 나타냈고, 나머지 정점(st.5~st.9)에서는 표층 평균값 범위가 0.020~0.026 mg/L, 저층 0.023~0.027 mg/L를 나타냈다. 행암만 st.4 정점에서 표층 최고값(0.056 mg/L)을 나타냈고, 마산만 st.1 정점에서 저층 최고값(0.053 mg/L)을 나타냈다. Chl.-a는 마산·행암만 정점 st.1~st.4에서 평균값 범위가 8.17~15.86 µg/L를 나타냈고, 나머지 정점(st.5~st.9)에서는 4.70~7.21 µg/L를 나타냈으며, 마산만 st.1 정점에서 최고값(15.86 µg/L)을 나타냈다.

Kim and Lee[2000]는 90년대 초반에 진해만 해역을 대상으로 실시한 3차원 수질 모델 결과에서 마산만이 오폐수의 과다유입과 식물플랑크톤 생산에 의해 COD, DIN, DIP 농도가 다른 만(灣)들에 비해 높게 형성됐다고 언급하였다. Yoon and Lee[2004]도 1994년의 진해만 해역에서 실시한 수질조사 결과에서 마산만이 다른 만(灣)들에 비해 COD, DIN, DIP 농도가 높았다고 보고하였다. 위와 같은 진해만 해역 내 만(灣)들 간의 유기물과 영양염류의 평균농도 차이는 2000년대에도 지속되고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 마산만의 가장 안쪽에 위치한 st.1 정점이 COD, DIN, DIP, Chl.-a 농도에서 높은 값을 보였다. Shin et al.[2004]은 1981년~1998년에 마산만에서 오염인자와 수질변동과의 관계를 조사하였다. 이 결과에서 마산만 내만이 외만보다 COD, DIN, DIP 농도가 높게 나타났는데 이는 마산만 안쪽이 육상 오염원에 인접해 있고, 해수의 유동이 바깥쪽에 비해 상대적으로 원활하지 않는

것과 관련이 있는 것으로 보고하였다. Cho et al.[1998]은 1996년과 1997년에 마산만에서 수질 부영양화 특성을 조사했는데, 마산만 외만에서 내만으로 갈수록 영양염류의 농도가 증가했다고 밝혔고, 마산만 수질은 여름에는 저질 퇴적층에서 용출되는 영양염류의 영향을 많이 받으며, 겨울에는 주변 집수역에서 유입되는 오·폐수의 영향을 주로 받는 것으로 추정하였다. Lim et al.[2007]도 마산만 수질 모니터링에서 COD, 영양염류 등을 통합한 지표 값이 마산만 내만에서 가장 높았고, 중앙부와 외만으로 갈수록 감소한다고 밝혔고, 이는 내만의 오염부하 영향이 크고, 외만으로 갈수록 외해수와와의 혼합으로 오염 부하가 다소 완화된 것과 관련이 있는 것으로 추측하였다.

3.2 수질항목 간 상관관계 및 요인분석

3.2.1 수질항목 간 상관관계

수질항목 간 관계를 파악하기 위해 표층과 저층을 구분하여 상관관계를 분석하였다(Table 2, 3). 상관계수 ±0.5 이상의 높은 상관을 보이는 항목을 살펴보면, 표층에서는 수온과 염분이 -0.52로 음의 상관을 보였고, 저층에서는 수온과 용존산소가 -0.68로 높은 음의 상관을 보였다. 영양염류인 DIN과 DIP는 표층과 저층 모두에서 각각 0.57과 0.71로 높은 양의 상관관계를 보였다. 표층 수온과 염분에서 나타난 음의 상관은 담수 유입의 영향으로 염분 농도는 낮아지고, 수온은 높아지는 현상과 관련이 있는 것으로 판단되며, 이러한 수온-염분 관계는 저층에서는 다소 줄어드는 것으로 나타났다($r = -0.38$). DIN과 DIP의 경우, 이들 간의 높은 상관으로 볼 때 이들 영양염류가 외부 유입이나 저층 퇴적물의 용출에 의해 증감하는 경향을 보이기 때문으로 추측된다. 저층의 경우, 고수온기 빈산소 하에서 저층의 활발한 유기물 분해가 영양염(DIN, DIP) 증가에 기여하는 것과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Danielsson[1998]; Kwon et al.

Table 2. Correlation coefficients of surface water quality in the study area during 2000~2012

	Salinity	pH	DO	COD	DIN	DIP	SS	Chl.-a
Temp.	-0.52**	0.26**	-0.35**	0.37**	0.13**	0.12**	0.19**	0.28**
Salinity		-0.19**	0.08 ^{ns}	-0.39**	-0.43**	-0.15**	-0.33**	-0.30**
pH			0.37**	0.40**	-0.20**	-0.16**	0.19**	0.31**
DO				0.17**	-0.30**	-0.37**	0.04 ^{ns}	0.14**
COD					0.14**	0.14**	0.26**	0.45**
DIN						0.57**	0.13**	0.18**
DIP							-0.00 ^{ns}	0.08 ^{ns}
SS								0.24**

** : $p < 0.01$; ns: non-significant.

Table 3. Correlation coefficients of bottom water quality in the study area during 2000~2012

	Salinity	pH	DO	COD	DIN	DIP
Temp.	-0.38**	-0.22**	-0.68**	0.08 ^{ns}	0.16**	0.25**
Salinity		-0.02 ^{ns}	0.24**	-0.33**	-0.23**	-0.23**
pH			0.37**	-0.05 ^{ns}	-0.18**	-0.12*
DO				-0.02 ^{ns}	-0.31**	-0.36**
COD					0.24**	0.24**
DIN						0.71**

** : $p < 0.01$; * : $p < 0.05$; ns: non-significant.

Table 4. Rotated factor matrix of surface water quality in the study area during 2000~2012

	Factor		
	1	2	3
COD	0.77	0.07	-0.08
Chl.-a	0.71	0.15	0.05
pH	0.67	-0.42	0.02
Salinity	-0.57	-0.26	0.46
SS	0.50	0.05	-0.13
DIN	0.18	0.87	-0.11
DIP	0.03	0.83	-0.10
Temp.	0.40	-0.05	-0.84
DO	0.39	-0.38	0.72
Eigen value	2.5	1.9	1.5
Variance (%)	27.5	20.6	16.5
Cumulative Variance (%)	27.5	48.1	64.6

Extraction method: principal component analysis; rotation method: varimax with Kaiser normalization

[2014]; Lehtoranta and Heistkanen[2003]).

3.2.2 표층 수질의 요인분석

해수 표층 수질항목에 대한 요인분석 결과(Table 4), 고유치(Eigen value) 1 이상에 해당하는 요인은 3개로 나타났다. 요인 1은 고유치가 2.5로 전체 수질항목에 대해 27.5%의 설명력을 가졌다. 요인 2는 1.9의 고유치를 가졌고, 20.6%의 설명력을 나타냈다. 요인 3은 1.5의 고유치를 가졌고, 16.5%의 설명력을 가졌다. 이들 요인 3개는 총 64.6%의 설명력을 보였다. 각 요인을 구성하는 주요 수질항목을 살펴보면, 요인 1에서는 유기물 오염 지표인 COD가 0.77로 양(+)의 높은 인자부하량을 가졌다. Chl.-a, pH, SS도 양(+)의 인자부하량을 나타냈고, 염분은 음(-)의 인자부하량을 보였다. 요인 2에서는 영양염류 항목인 DIN, DIP가 0.8 이상의 높은 양(+)의 인자부하량을 나타냈다. 요인 3에서는 수온이 -0.84로 음(-)의 인자부하량을 보였고, 용존산소가 0.72로 양(+)의 인자부하량을 나타냈다. 요인 1은 염분과 음(-)의 상관, COD, Chl.-a, SS와는 양(+)의 상관을 보여 “외부 담수유입과 내부 자생에 의한 유기물 증가 요인”과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 요인 2는 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가 요인”과 밀접한 관련이 있는 것으로 추측되며, 요인 3은 표층 수온과 용존산소 농도의 상반된 경향이 두드러지기 때문에 온도와 산소포화도 간 음(-)의 관계를 고려한 “용존산소 증가 요인”으로 판단된다.

3.2.3 요인값에 따른 지점별 표층 수질특성

조사 정점 간의 표층 수질 특성을 비교하기 위하여 요인분석 결과 산출된 요인특성을 조사 정점별로 산술평균한 값의 분포도를 Fig. 2에 나타냈다. 마산만의 가장 안쪽에 위치한 st.1 정점은 요인 1과 요인 2에서 각각 0.70과 0.88로 전체 정점에서 가장 높은 점수를 보였다. 즉, “외부 담수 유입과 내부 자생에 의한 유기물 증가(요인 1)”와 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가(요인 2)”가 다른 지점

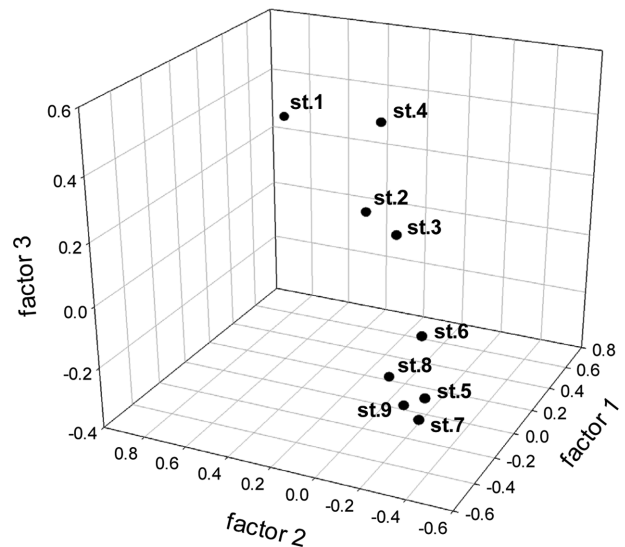


Fig. 2. Average factor scores of each station in relation to surface water quality during 2000~2012.

에 비해 상대적으로 높게 나타나는 것으로 판단할 수 있다. 이는 Table 1의 표층 평균농도 값에서도 알 수 있듯이 9개 정점 가운데 마산만의 st.1 정점이 COD, DIN, DIP, Chl.-a에서 상대적으로 높은 값을 나타내는 것과 일치하는 결과이다. 이에 비해 같은 마산만에 속한 st.2와 st.3 정점은 st.1 정점보다 상대적으로 작은 요인값을 보였다. 그리고 마산만에 인접한 행암만 st.4 정점은 요인 1인 “외부 담수유입과 내부 자생에 의한 유기물 증가 요인”의 점수가 0.31로 다소 높았고, 요인 3인 “용존산소 증가 요인”의 점수는 0.42로 9개 정점 가운데 가장 높게 나타났다. 진해만 외해 경계부(st.5)와 고현만(st.6), 원문만(st.7), 당항만(st.8), 진동만(st.9) 정점은 3개 요인 모두에서 낮은 값의 범위에 속하였다. 이는 Table 1의 평균농도 값에서 나타난 바와 같이 이들 5개 정점이 표층 COD, DIN, DIP, Chl.-a 농도에서 대체로 낮은 농도값을 보이는 것과 일치한다.

Table 1에서 살펴본 바와 같이 마산만 st.1 정점이 위치한 내만 안쪽 해역은 육상 오염원에 인접해 있고, 해수의 유동이 바깥쪽에 비해 상대적으로 원활하지 않기 때문에 외부 담수 유입과 내부 자생에 의한 유기물 증가와 내·외부의 영양염류 증가 요인에 크게 영향을 받을 수밖에 없는 것으로 판단된다. 특히, 내부 자생에 의한 유기물 증가는 식물플랑크톤에서 유래한다고 볼 수 있는데, Baek and Kim[2010]이 2008년 하계에 진해만 해역에서 실시한 식물플랑크톤 군집구조 연구에 따르면 담수기원의 높은 영양염 농도와 낮은 염분농도의 영향을 강하게 받는 마산만 내만쪽에서 높은 Chl.-a 농도와 식물플랑크톤 현존량을 보였고, 식물플랑크톤 종조성 또한 마산만 외만이나 진해만과는 차이를 보였다고 밝혔다. Hyun *et al.*[2011]도 진해만 해역에서 2010년 동계에 실시한 식물플랑크톤 군집특성 연구에서 마산만이 다른 만(灣)보다 식물플랑크톤 현존량, Chl.-a, 영양염류 농도 등이 높게 나타났고, 마산만 내에서는 내측 해역이 대체로 높은 값을 보였다고 밝혔다.

Table 5. Rotated factor matrix of bottom water quality in the study area during 2000~2012

	Factor		
	1	2	3
DO	0.87	-0.22	-0.06
Temp.	-0.85	-0.01	0.32
pH	0.55	-0.25	0.35
DIN	-0.13	0.90	0.12
DIP	-0.19	0.86	0.16
Salinity	0.28	-0.06	-0.82
COD	0.11	0.32	0.67
Eigen value	1.9	1.8	1.4
Variance (%)	27.5	25.2	19.7
Cumulative Variance (%)	27.5	52.7	72.4

Extraction method: principal component analysis; rotation method: varimax with Kaiser normalization.

3.2.4 저층 수질의 요인분석

해수 저층 수질항목에 대한 요인분석 결과(Table 5), 고유치(Eigen value) 1 이상에 해당하는 요인은 3개로 나타났다. 요인 1은 고유치가 1.9로서 전체 수질항목에 대해 약 27.5%의 설명력을 가졌다. 요인 2는 1.8의 고유치를 가졌고, 25.2%의 설명력을 나타냈다. 요인 3은 1.4의 고유치를 가졌고, 19.7%의 설명력을 가졌다. 이들 요인 3개는 총 72.4%의 설명력을 보였다. 각 요인을 구성하는 주요 수질항목을 살펴보면, 요인 1에서는 수온이 -0.85로 음(-)의 인자부하량을 보였고, 이에 비해 용존산소와 pH가 각각 0.87, 0.55로 양(+)의 인자부하량을 나타냈다. 요인 2에서는 표층과 마찬가지로 영양염류 항목인 DIN, DIP가 0.8 이상의 높은 양(+)의 인자부하량을 나타냈다. 요인 3에서는 유기물 오염 지표인 COD가 0.67로 양(+)의 인자부하량을 가졌고, 염분이 -0.82로 음(-)의 인자부하량을 보였다. 요인 1은 저층 수온과 용존산소 농도의 상반된 경향이 두드러지기 때문에 온도와 산소포화도 간 음(-)의 관계를 고려할 때 “용존산소 증가 요인”으로 판단된다. 요인 2는 저층에서 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가 요인”과 관련이 있는 것으로 추측되며, 요인 3은 COD와 양(+)의 상관, 염분과 음(-)의 상관을 보여 “외부 담수유입에 의한 유기물 증가 요인”과 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.2.5 요인값에 따른 지점별 저층 수질특성

저층의 요인값에 따른 지점별 수질특성은 표층과 달리 지점별로 좀 더 세분화되어 나타났다(Fig. 3). 마산만의 st.1 정점은 저층 수질 특성의 주요 요인 중 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가(요인 2)”와 “외부 담수유입에 의한 유기물 증가(요인 3)”에서 매우 높은 요인값을 보여 이들 두 요인에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 Table 1의 저층 평균농도 값에서도 알 수 있듯이 9개 정점 가운데 마산만 st.1 정점이 저층의 COD, DIN, DIP에서 상대적으로 높은 값을 나타내는 것과 일치하는 결과이다. 또한 Fig. 2의 st.1 정점의 표층수 요인값 분포와 마찬가지로 저층 수질의 특성도 유기물과 영양염류 부하가 주된 요소임을 알 수 있다. 다음으

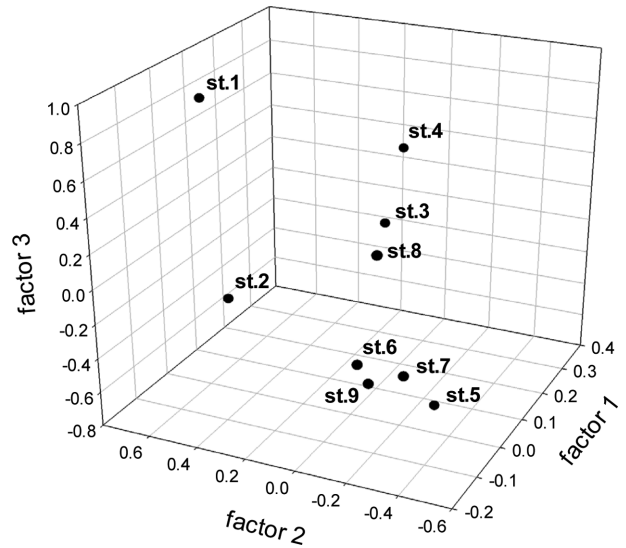


Fig. 3. Average factor scores of each station in relation to bottom water quality during 2000~2012.

로 마산만 st.2 정점의 저층은 3가지 요인 중 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가(요인 2)”에 크게 영향을 받는 것으로 나타났고, 마산만 st.3 정점은 st.1과 st.2 정점에 비해 영양염류 증가 요인(요인 2)에 의한 영향이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 행암만의 st.4

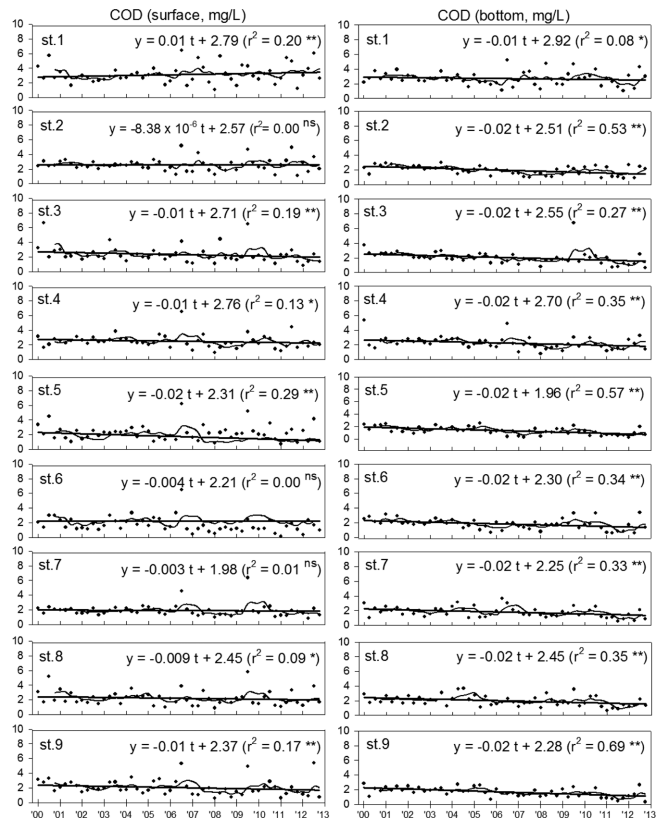


Fig. 4. Annual variations of COD concentrations in surface and bottom waters of each station during 2000~2012 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$; ns: non-significant).

정점의 저층 수질 특성은 표층수와 비슷하게 “용존산소 증가 요인(요인 1)”과 “외부 담수유입에 의한 유기물 증가 요인(요인 3)”이 높게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 나머지 5개 정점(st.5~st.9)은 표층 수질과 마찬가지로 “용존산소 증가 요인(요인 1)”과 “내·외부의 영양염류(DIN, DIP) 증가 요인(요인 2)”에 대체로 적은 영향을 받는 것으로 나타났다. “외부 담수유입에 의한 유기물 증가 요인 (요인 3)”에서는 st.5, st.6, st.7, st.9 정점이 표층과 마찬가지로 낮은 값의 범위를 나타냈지만, st.8 정점의 저층은 표층과 달리 “외부 담수유입에 의한 유기물 증가 요인”에 다소 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.3 수질의 경년 변동 특성

진해만 해역 수질의 장기변동 특성을 파악하기 위해 COD, DIN, DIP, Chl.-a 농도에 대해 회귀분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4-Fig. 7에 나타내었다. 표층 COD 농도의 경우(Fig. 4), 마산만 st.1 정점을 제외한 나머지 8개 정점에서 기울기가 마이너스(-)로 나타났지만, 감소 경향이 통계적으로 유의하지 않거나, 결정계수(r^2)가 0.30 이하로 매우 낮았다. 이에 비해 저층의 COD 농도는 마산만 st.1 정점을 제외한 8개 정점에서 기울기의 감소경향 및 결정계수(r^2) 범위(0.27~0.69)가 표층에 비해 통계적으로 높게 나타났다.

DIN과 DIP 농도의 경우(Fig. 5, 6), 표층과 저층 모두 그리고 9개 정점 모두에서 두드러진 감소추세를 나타냈다. 특히, COD 농도에서 두드러진 감소 경향이 보이지 않았던 마산만 st.1 정점의 경

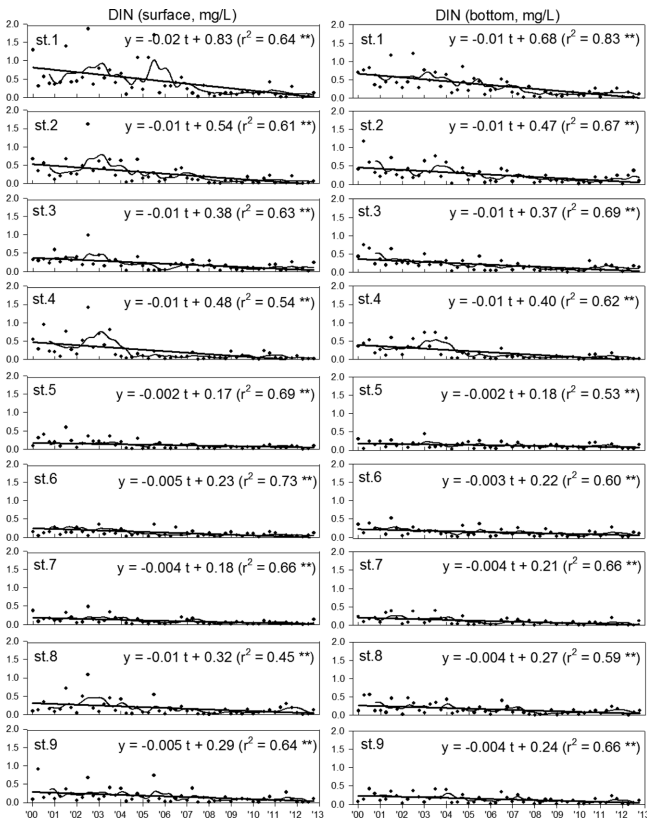


Fig. 5. Annual variations of DIN concentrations in surface and bottom waters of each station during 2000~2012(**: $p < 0.01$).

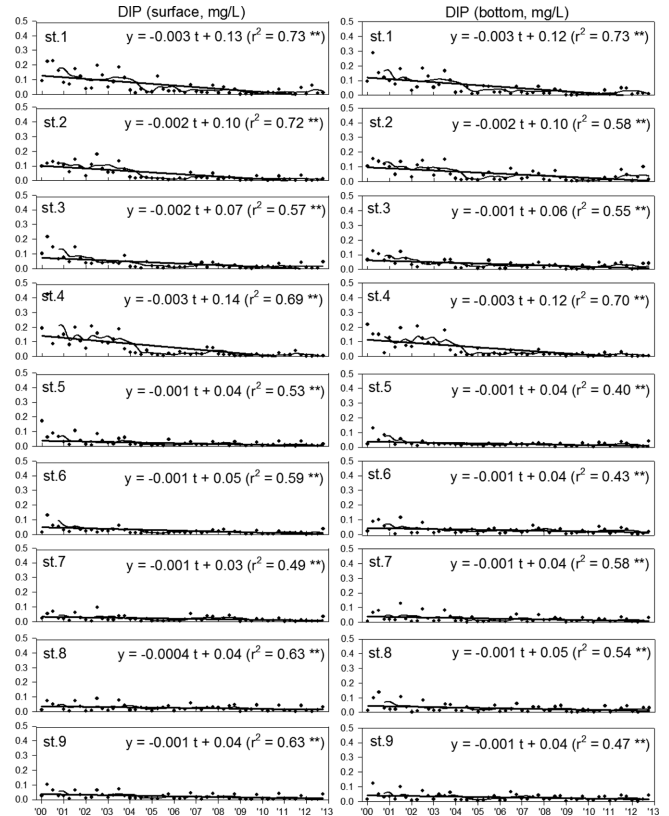


Fig. 6. Annual variations of DIP concentrations in surface and bottom waters of each station during 2000~2012 (**: $p < 0.01$).

우도 표층과 저층 모두 DIN과 DIP의 결정계수(DIN 표층: 0.64, DIN 저층: 0.83, DIP 표층: 0.73, DIP 저층: 0.73)가 통계적으로 유의하게 높게 나타나 영양염류의 감소추세가 두드러지게 나타났다. 표층 Chl.-a 농도의 경우(Fig. 7), 증감추세가 통계적으로 유의하지 않거나, 결정계수(r^2)가 0.2 미만으로 매우 낮게 나타나 장기적으로 진해만 해역에서 큰 변동은 없었던 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 성장의 제한 영양염 농도의 하한치는 질소의 경우 1 μM 미만, 인의 경우 0.2 μM 미만으로 알려져 있다(Son *et al.*[2014]). 본 연구에서 진해만 9개 정점의 표층과 저층의 DIN과 DIP의 연 평균 농도 값들은 Table 1에 나타낸 바와 같이 식물플랑크톤 성장의 제한 영양염 농도 하한치보다 높은 값을 유지하고 있다. 따라서 이들 영양염은 식물플랑크톤 성장에 제한 요인으로 작용하지 않는다고 볼 수 있고, 이로 인해 DIN과 DIP 농도의 장기변동 추세와 Chl.-a 농도의 장기변동 추세가 일치하지 않게 나타난 것으로 판단된다.

Kim *et al.*[2012]은 1995년~2005년 동안 실시한 마산만 수질 변동 연구에서 2001년 이후의 마산만 DIN과 COD 농도의 감소는 하수처리 용량 증설과 관련이 있는 것으로 보고하였다. Chang *et al.*[2012]은 2005년~2010년에 마산만 특별관리해역의 수질변동 연구에서 해수의 COD 농도가 시계열적으로 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 2007년의 1단계 오염총량제(COD) 시행 이후 육상기원의 COD 부하량이 줄어든 것과 관련이 있는 것으로 보고하였다. Kwon *et al.*[2014]은 마산만의 2007년 오염총량제 시행 전후의 수

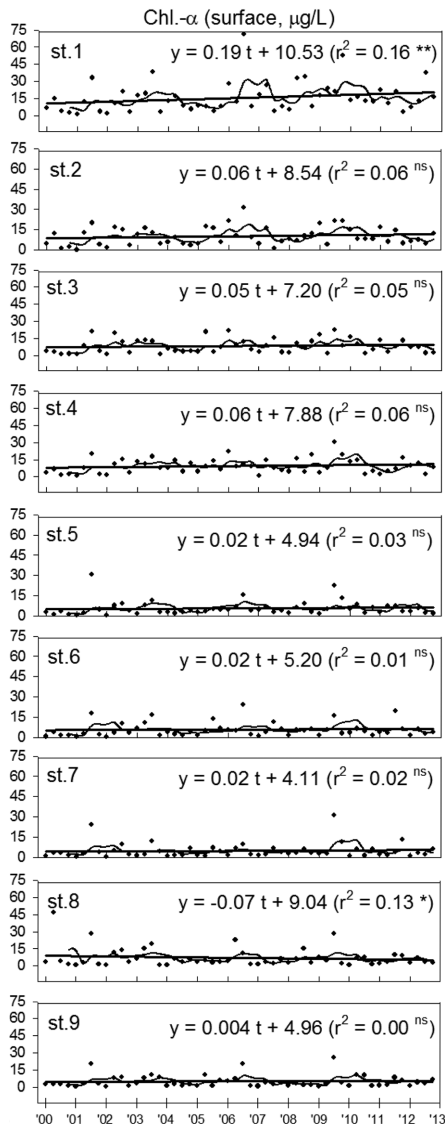


Fig. 7. Annual variations of Chl.-a concentrations in surface and bottom waters of each station during 2000-2012 (**: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; ns: non-significant).

질 비교에서 DIN과 DIP 농도가 이전(2000년~2006년)에 비해 각각 68.1~76.0%와 66.2~76.6% 감소한 것으로 분석하였고, 오염저감 정책이 수질 개선에 영향을 준 것으로 평가하였다.

4. 결 론

진해만 해역의 장기적 수질변동 특성을 파악하기 위하여 2000년부터 2012년까지 진해만 해역 내 9개 조사 정점에서 수질 모니터링을 실시하고 그 결과를 고찰하였다. 유기물 오염 지표인 화학적 산소요구량(COD)과 부영양화와 관련이 많은 영양염류(DIN, DIP) 및 클로로필 *a* (Chl.-*a*)의 평균농도는 육상 유역으로부터의 오염부하가 큰 마산만이 다른 만(灣)들에 비해 대체로 높았다. 특히, 마산만의 가장 인쪽에 위치한 st.1 정점은 육상 오염원에 인접해 있고,

해수의 유동이 원활치 않은 특성 등으로 인해 가장 높은 농도를 나타냈다. 이러한 특성은 요인분석에서도 확인되었는데, 마산만 st.1 정점은 표층수와 저층수 모두 유기물과 영양염류 증가 요인에 대한 영향이 주된 특징으로 나타났다. 이에 비해 진해만 외해 경계부(st.5)와 고현만(st.6), 원문만(st.7), 당항만(st.8), 진동만(st.9) 정점들은 표층수와 저층수 모두에서 유기물과 영양염류의 증가 요인에 대한 영향이 마산만에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 진해만 해역 수질의 장기변동 특성을 살핀 결과, 표층 COD 농도는 뚜렷한 감소경향이 없었지만, 저층 COD 농도는 마산만 st.1 정점을 제외한 나머지 8개 정점에서 뚜렷한 감소경향을 보였다. 그리고 영양염류(DIN, DIP) 농도의 경우, 표층과 저층 모두 그리고 9개 정점 모두에서 두드러진 감소추세를 나타냈다. 마산만에서의 감소추세는 특별관리해역 지정 이후 시행된 오염총량제 등이 수질 개선에 영향을 준 것으로 판단되며, 이와 더불어 진해만 해역이 전반적으로 함께 영향을 받은 것으로 여겨진다.

후 기

이 연구는 국립수산과학원(어장환경모니터링, RP - 2014 - ME - 033)의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료 수집 및 분석에 노력해 주신 국립수산과학원 관련 연구원들께 감사의 뜻을 포함합니다.

References

- [1] Baek, S.H. and Kim, Y.O., 2010, "The Study of Summer Season in Jinhae Bay - Short-term Changes of Community Structure and Horizontal Distribution Characteristics of Phytoplankton -", Korean J. of Environ. Bio., Vol. 28, No. 3, 115-124.
- [2] Chang, W.K., Ryu, J.S., Yi, Y.J., Lee, W.C., Lee, C.W., Kang, D.S., Lee, C.H., Hong, S.J., Nam, J.H. and Khim, J.S., 2012, "Improved Water Quality in Response to Pollution Control Measures at Masan Bay, Korea", Mar. Pollut. Bull., Vol. 64, 427-435.
- [3] Cho, H.Y. and Chae, J.W., 1998, "Analysis on the Characteristics of the Pollutant Load in Chinhae-Masan Bay", Korean Soc. of Coast. and Ocean. Eng., Vol. 10, No. 3, 132-140.
- [4] Cho, H.Y., Chae, J.W. and Jeong, S.T., 2000, "Pollutant Budget Change Due to Construction of Wastewater Treatment Plant in Masan Bay", Korean Soc. of Coast. and Ocean. Eng., Vol. 12, No. 3, 149-155.
- [5] Cho, K.J., Choi, M.Y., Kwak, S.K., Im, S.H., Kim, D.Y., Park, J.G. and Kim, Y.E., 1998, "Eutrophication and Seasonal Variation of Water Quality in Masan-Jinhae Bay", 「The Sea」, J. of the Korean Soc. of Oceanogr., Vol. 3, No. 4, 193-202.
- [6] Choi, H.W., Park, J.M., Kim, H.W. and Kim, Y.O., 2007, "Identifying Spatial Distribution Pattern of Water Quality in Masan Bay Using Spatial Autocorrelation Index and Pearson's r ", Ocean. and Polar Res., Vol. 29, No. 4, 391-400.
- [7] Danielsson, Å., 2014, "Influence of hypoxia on silicate concentration in the Baltic Proper (Baltic Sea)", BOREAL ENVI-

- RONMENT RESEARCH, Vol. 19, online preprint.
- [8] Hong, S.J., Lee, W.C., Jung, R.H., Oh, H.T., Jang, J.H., Goo, J.H. and Kim, D.M., 2007, "Ecosystem Modelling for Improvement Summer Water Quality of JinHae Bay in 2003", *J. of the Korean Soc. of Mar. Environ. and Saf.*, Vol. 13, No. 2, 103-110.
- [9] Hyun, B.G., Shin, K., Kim, D.S., Kim, Y.O., Joo, H.M., and Baek, S.H., 2011, "Understanding of Phytoplankton Community Dynamics Through Algae Bioassay Experiment During Winter Season of Jinhae Bay, Korea", 『The Sea』, *J. of the Korean Soc. of Oceanogr.*, Vol. 16, No. 1, 27-38.
- [10] Jeong, D.H., Shin, H.H., Jung, S.W. and Lim, D.I., 2013, "Variations and Characters of Water Quality during Flood and Dry Seasons in the Eastern Coast of South Sea, Korea", *The Korean J. of Environ. Bio.*, Vol. 31, No. 1, 19-36.
- [11] Jung, S.W., Lim, D., Shin, H.H., Jeong, D.H. and Roh, Y.H., 2011, "Relationship between Physico-Chemical Factors and Chlorophyll- α Concentration in Surface Water of Mansan Bay: Bi-Daily Monitoring Data", *The Korean J. of Environ. Bio.*, Vol. 29, No. 2, 98-106.
- [12] Kim, C.K. and Lee, P.Y., 2000, "Three-Dimensional Water Quality Modeling of Chinhae Bay", *J. of Korean Soc. of Coast. and Ocean. Eng.*, Vol. 12, No. 1, 1-10.
- [13] Kim, D.S., Lee, C.W., Choi, S.H. and Kim, Y.O., 2012, "Long-term Changes in Water Quality of Masan Bay, Korea", *J. of Coast. Res.*, Vol. 28, No. 4, 923-929.
- [14] Kim, J.H. and Lee, I.C., 2011, "A Numerical Prediction of Residence Time According to Freshwater Influx in Enclosed Bay", *J. of the Korean Soc. of Mar. Environ. & Saf.*, Vol. 17, No. 4, 339-343.
- [15] Kim, S.S., Lee, D.Y., Han, H.J., Oh, H.R. and Moon, B.H., 2009, "Development and Application of Pollutant Load Duration Curve for Stream Water Quality Management to Masan Bay", *Korean Soc. of Water and Wastewater & Korean Soc. on Water Environ.*, Fall Academic Meeting Proceedings, 547-548.
- [16] Kwon, J.N., Lim, J.H., Shim, J., Lee, J. and Choi, T.J., 2014, "The Long-Term Variations of Water Quality in Masan Bay, South Sea of Korea", *J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. and Energy*, Vol. 17, No. 3, 212-223.
- [17] Lee, B.H., 2006, "Analysis of Non-Point Pollutants Outflow Pattern in Jinhae-Masan Basin", *The J. of Eng. Paichai University, Korea*, Vol. 8, No. 1, 107-118.
- [18] Lee, C.W., Kwon, Y.T., Yang, K.S., Jang, P.G. and Han, S.D., 1998, "Loading Characteristics and Environmental Changes in Closed Coastal Water", *J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. Eng.*, Vol. 1, No. 2, 60-70.
- [19] Lee, D.I. and Park, C.K., 2003, "The Ecological Modeling for Estimation of Total Allowable Pollutant Loading Capacity in Masan Bay", *J. of Korean Soc. on Water Qual.*, Vol. 19, No. 5, 575-583.
- [20] Lee, J. and Han, M.S., 2007, "Change of Blooming Pattern and Population Dynamics of Phytoplankton in Masan Bay, Korea", 『The Sea』, *J. of the Korea Soc. of Oceanogr.*, Vol. 12, No. 3, 147-158.
- [21] Lee, M.K., Hwang, J.W. and Choi, Y.K., 1996, "Water Quality Evaluation on the Bottom Water of Masan Bay by Multivariate Analysis", *J. of the Korean Environ. Sciences Soc.*, Vol. 5, No. 1, 15-23.
- [22] Lee, W.L. and Moon, S.W., 2007, "Variations of Water Quality and Management of Masan Bay Using a Water Quality Model", *Environ. Res. Inst., Kyungnam University*, Vol. 30, 35-42.
- [23] Lehtoranta, J. and A.S. Heiskanen, 2003, "Dissolved iron : phosphate as indicator of phosphate release to oxic water of the inner and outer coastal Baltic Sea", *Hydrobiologia*, Vol. 492, 69-83.
- [24] Lim, D.L., Kim, Y.O., Kang, M.R., Jang, P.K., Shin, K. and Jang, M., 2007, "Variability of Water Quality and Limiting Factor for Primary Production in Semi-enclosed Masan Bay, South Sea of Korea", *Ocean. and Polar Res.*, Vol. 29, No. 4, 349-366.
- [25] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010, Standard Method of Oceanic Environment, 3-495(국토해양부, 2010, 해양환경공정시험기준, 3-495).
- [26] Oh, H.T., Goo, J.H., Park, S.E., Choi, Y.S., Jung, R.H., Choi, W.J., Lee, W.C. and Park, J.S., 2005, "Analysis of Water Quality Caused by Improvement of Sewage Treatment Plant in Masan Bay", *J. of the Environ. Sci.*, Vol. 14, No. 8, 777-783.
- [27] Shin, S.Y., Lee, C.I., Hwang, S.C. and Cho, K.D., 2004, "Relationship between Pollution Factors and Environmental Variation in Waters around Masan Bay", *J. of the Korean Soc. of Mar. Environ. & Saf.*, Vol. 10, No. 2, 69-79.
- [28] Sohn, J.H., Ahn, T.Y. and Kim, S.J., 2000, "Environmental Factors Affecting Distribution of Heterotrophic Bacteria and Chlorophyll a Content in the Water Column of Masan and Haengam Bays, Korea", *J. of the Korean Soc. for Mar. Environ. Eng.*, Vol. 3, No. 4, 66-75.
- [29] Son, M.H., Kim, D.S. and Baek, S.H., 2014, "Distributional Characteristics of Phytoplankton and Nutrient Limitation during Spring Season in Jinhae Bay", *J. of the Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, Vol. 15, No. 5, 3345-3350.
- [30] Yoo, M.W., Kim, Y.D., Lyu, S.W. and Seo, I.W., 2008a, "A Study on Mixing Behavior of Pollutants by Tide in Masan Bay", *Korean Soc. of Water and Wastewater & Korean Soc. on Water Environ.*, Spring Academic Meeting Proceedings, 81-82.
- [31] Yoo, M.W., Kim, Y.D., Lyu, S.W. and Seo, I.W., 2008b, "A Study on Advection and Diffusion of Pollutants Considering Tidal Elevation in Masan Bay", *Korean Society of Water and Wastewater & Korean Soc. on Water Environ.*, Fall Academic Meeting Proceedings, 516-517.
- [32] Yoon, S.J. and Lee, I.C., 2004, "Water Quality Variations in Jinhae Bay by Dredging & Operating the Sewage Disposal Plant", *Korean Soc. of Ocean. Eng.*, Spring Academic Meeting Proceedings, 117-122.

Received 12 September 2014

Revised 7 October 2014

Accepted 14 October 2014