

남해 마산만 수질의 장기 변동 특성

권정노[†] · 임재현 · 김정희 · 이장호 · 최태준
국립수산과학원 어장환경과

The Long-Term Variations of Water Quality in Masan Bay, South Sea of Korea

Jung-No Kwon[†], Jae-Hyun Lim, Jeonghee Shim, Jangho Lee and Tae-Jun Choi

Marine Environment Research Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

요 약

남해 마산만의 수질 장기 변동 특성을 파악하기 위해 3개 정점(표·저층수)에서 장기(2000~2012년) 관측된 영양염류 등의 주요 성분들의 자료를 분석하였다. 관측기간 동안 표층수에서 COD, DIN, DIP의 평균 농도는 각각 2.70 ± 0.09 mg/L, 19.66 ± 1.84 μ M, 1.39 ± 0.13 μ M이며, 저층수에서는 각 2.22 ± 0.07 mg/L, 18.53 ± 1.36 μ M, 1.47 ± 0.12 μ M이다. 표층수의 경우 전 계절에서 부영양(eutrophic) 단계 수준을 보이며, DIN의 농도는 8월부터 증가하기 시작하여 11월에 최대값에 도달한 후, 2월부터 감소하기 시작하여 5월에 최소값에 이르는 계절적 변동을 보인다. DIP와 DSi의 경우, 수온이 높고, 산소 농도가 낮은 8월의 저층수에서 가장 높았고, 2월이 가장 낮았다. 수질 성분들의 상관분석 및 요인분석 결과에 의하면, 표층수의 경우 담수유입에 따른 용존무기질소와 내부생산이 주요 요인이었고, 저층수는 용존산소의 변동과 이에 따른 DIP, DSi의 변동이 주요 요인으로 나타났다. 또한, 장기변동 분석결과에 의하면, ‘총량규제’ 실시 이후(2007~2012년) 마산만의 DIN과 DIP 평균농도는 이전(2000~2006년)에 비해 각각 68.1~76.0%와 66.2~76.6% 감소한 것으로 나타나, 2007년 ‘총량규제’ 실시와 이에 따른 오염저감 정책이 수질(특히 영양염) 개선에 큰 영향을 준 것으로 평가된다.

Abstract – For the better understanding of long-term and seasonal variations of water quality in Masan Bay, South Sea of Korea, we analyzed the archive data monitored at three stations of the bay during the last 13 years (2000–2012). The average concentrations of the chemical oxygen demand (COD), the dissolved inorganic nitrogen (DIN) and the dissolved inorganic phosphorus (DIP) during the monitoring period are 2.70 ± 0.09 μ L, 19.66 ± 1.84 μ M and 1.39 ± 0.13 μ M in surface water, respectively, and 2.22 ± 0.07 μ L, 18.53 ± 1.36 μ M and 1.47 ± 0.12 μ M in bottom water, respectively. The trophic state of the surface water was the eutrophic level in Masan Bay during the four seasons. The DIN concentrations of both surface and bottom waters increased from August to November and showed the highest average in November. However, The DIN decreased from February to May and showed the lowest average in May. The concentrations of the DIP and the dissolved silicate (DSi) in bottom waters had the highest averages in August because of the high water temperature and oxygen deficient condition. The results of correlation analysis and factor analysis showed that the main factors of surface waters were inflow of nutrients from terrestrial areas and internal production, and the main factors of bottom waters were the variations of the dissolved oxygen (DO), the DIP, and the DSi. The DIN and DIP average concentrations (2007~2012) had decreased in range of 68.1%~76.0% and 66.2~76.6%, respectively from 2007 in which the “Regulation of Total Emission” was established in Masan Bay. Therefore, it could have had positive effects on water quality improvement to take the “Regulation of Total Emission” and other actions such as reducing water pollutions in Masan Bay from 2007.

Keywords: Masan Bay(마산만), COD(화학적산소요구량), Nutrients(영양염류), Long Term Variation(장기변동), Regulation of Total Emission(총량규제)

[†]Corresponding author: jungnok@korea.kr

1. 서 론

남해 동부에 위치한 마산만은 1970년대 이후 주변 지역의 산업화에 의해 해양환경이 지속적으로 악화되어, 행암만, 진동만, 마산만 등을 포함하고 있는 진해만 전체 오염 부하량의 80~90%를 차지하고(Cho and Chae[1998]) 있다. 마산만은 유역 내 인구밀도가 약 2,713명/km²으로 전국 평균 485.6명/km²을 5배 이상 상회하고, 유입하천은 타원 모양의 하천으로 길이가 짧고 경사가 급하기 때문에 하천을 경유하는 오염물질이 직접 마산만으로 유입되며, 덕동 및 진해 하수종말 처리시설의 배출구에서 COD 기준 50% 이상의 오염물질이 유입되는 해역으로 전국 67개 연안 중 시화호 다음으로 해양환경이 훼손된 해역이다(국토해양부[2012]).

그동안 마산만의 부영양화 및 오염에 따른 해양생태계의 변동을 개선하기 위해 하수처리장의 건설 및 만내 퇴적층의 준설과 같은 노력 등이 있어 왔다(Cho *et al.*[1998]). 1995년 처리용량 280,000 m³/day의 덕동하수처리장 건설 후 마산만 전체 만내의 COD, TN 및 TP 등의 농도는 감소되었고(Cho *et al.*[2000]), 2001년 하수처리장의 처리용량이 증설된 후(280,000→500,000 m³/day) DIN의 농도가 크게 감소하였다(Kim *et al.*[2012]). 이와 함께 환경용량을 초과한 육상오염 부하량 유입을 줄이기 위하여 2000년 마산만 유역을 ‘특별관리해역’으로 지정하고, 2005년 연안오염 총량관리(Total Maximum Daily Load, TMDL) 제도 도입을 통해, 2007년 COD를 대상으로 ‘총량규제’를 실시하였다(국토해양부[2012]; Cho and Yang[2012]).

마산만과 같은 연안 해역의 효율적 보존과 수역의 지속적 이용을 위해선 체계적인 환경 모니터링 시스템의 구축 운영에 대한 필요성이 제기되었고, 연안 해역에 대한 다양한 모니터링을 실시하고 있다(Kim *et al.*[2011], 국립수산물과학원[2013]). 이러한 정기 모니터링의 결과물인 장기 관측 자료는 연안의 환경 특성 및 장기변동 경향을 파악 할 수 있어, 연안 환경의 예측과 관리를 위한 정책 수립에 유용하다. 그 동안, 하구둑 건설 전·후의 금강 하구역의 암모니아질소의 축적 경향 파악(Kwon *et al.*[2001]), 가로림만 연안 DIN 및 COD의 장기변동(Park *et al.*[2009]), 고성만 DIP의 축적(Kwon[2010]) 및 한산거제만의 DIN 감소(Kwon *et al.*[2013]) 경향 등의 연구 결과들은 이러한 장기관측 자료의 분석을 통해 얻어질 수 있었다.

따라서 본 연구는 장기관측 자료를 이용하여 마산만 해역의 수질 성분 간의 상관관계를 파악하고, 수질성분들의 정점별, 계절별 변동 그리고 중·장기변동 특성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

연구해역의 장기 수질 변동을 파악하기 위해 2000~2012년 동안 2월, 5월, 8월, 11월 마산만에 위치한 3개 정점(st. 1~st. 3)에 대해 현장관측을 실시하였다(Fig. 1).

관측된 수질항목은 수온, 용존산소(DO), 수소이온농도지수(pH),

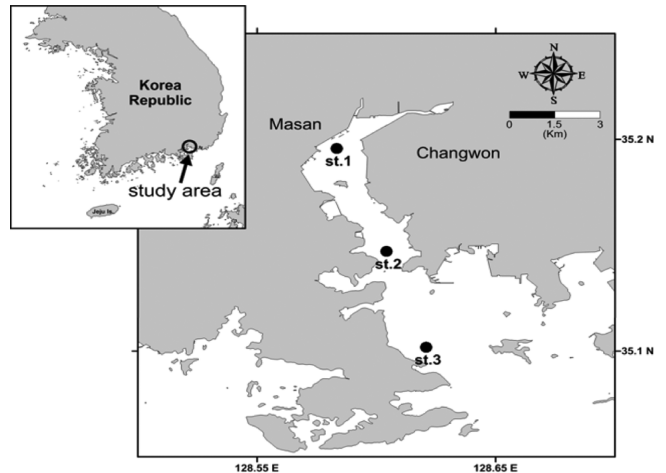


Fig. 1. The location of long term monitoring sites in Masan Bay.

염분, 화학적산소요구량(COD), 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP), 용존규산규소(DSi), 총부유물질(SS) 및 chlorophyll-a였다.

각 성분별 분석방법은 다음과 같다. 수온, pH, 염분은 현장관측 장비(YSI 6600)을 이용하여 현장에서 관측하였고, DO는 DO meter 또는 Winkler-Azide 방법으로 측정하였고, 화학적산소요구량(COD)은 알칼리성 과망간산칼륨법으로 측정하였다. 암모니아질소는 Indophenol 청색법, 아질산질소는 α -NED법, 질산질소는 Cu-Cd 칼럼을 이용한 아질산질소 환원법으로 측정하였다. DIN은 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소의 합으로 나타내었고, DIP는 ascorbic acid를 이용한 몰리브덴청법, DSI는 몰리브덴청법, chlorophyll-a는 GF/F에 여과 후 acetone으로 추출하여 분광광도계로 측정하였다(국토해양부[2010]).

자료의 해석을 위하여 통계프로그램(SPSS ver. 12.0)을 이용하여 평균±표준오차(mean±se) 등의 기술통계와 수질성분간의 상호관계를 파악하기 위한 상관분석(correlation analysis), 요인분석(factor analysis)을 실시하였고, 수질의 장기변동을 파악하기 위하여 독립표본 t-test를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 특성

마산만 3개 정점에 대한 13년간 표·저층 수질의 전체 범위와 평균 및 표준오차를 Table 1에 제시하였고, 정점별 수질의 평균 및 표준오차에 대한 그래프를 Fig. 2에 나타내었다.

조사기간 중 수온은 모든 정점의 표·저층수에서 각각 3.81~28.30 °C (16.09±0.58 °C)와 2.22~24.40 °C (14.36±0.45 °C) 범위로, 표층수에서 평균 1.73 °C 높고, 정점간 차이는 크지 않다. 염분은 표층과 저층수에서 각각 2.52~34.30 psu (30.41±0.32 psu)와 27.08~34.30 psu (32.22±0.10 psu) 범위로, 저층수에서 평균 1.81 psu 높고, 내만(st. 1)에서 외만(st. 3)으로 갈수록 표·저층의 염분이 모두 높아지는 경향을 보였다.

Table 1. The long-term characteristics of water parameters in Masan Bay from 2000 to 2012

parameter	layer	min	max	mean	se
temperature (°C)	surface	3.81	28.30	16.09	0.58
	bottom	2.22	24.40	14.36	0.45
salinity (psu)	surface	2.52	34.30	30.41	0.32
	bottom	27.08	34.30	32.22	0.10
pH	surface	6.12	8.86	8.12	0.02
	bottom	6.12	8.30	7.99	0.02
DO (mg/L)	surface	4.66	14.99	9.20	0.17
	bottom	0.00	13.68	7.41	0.25
COD (mg/L)	surface	0.83	6.64	2.70	0.09
	bottom	0.62	6.74	2.22	0.07
ammonia (μM)	surface	0.00	62.27	8.69	0.84
	bottom	0.21	81.82	9.78	0.90
nitrite (μM)	surface	0.00	17.99	1.10	0.17
	bottom	0.00	19.36	1.03	0.15
nitrate (μM)	surface	0.00	90.14	9.86	1.21
	bottom	0.00	58.34	7.72	0.80
DIN (μM)	surface	0.22	133.34	19.66	1.84
	bottom	0.54	86.83	18.53	1.36
DIP (μM)	surface	0.00	7.38	1.39	0.13
	bottom	0.00	9.32	1.47	0.12
DSi (μM)	surface	0.00	44.78	12.05	1.11
	bottom	0.00	68.05	17.55	1.50
SS (mg/L)	surface	0.60	34.40	7.07	0.42
	bottom				
chlorophyll-a (μg/L)	surface	0.17	71.00	11.37	0.79
	bottom				
N/P ratio	surface	0.11	296.14	26.70	3.16
	bottom	2.75	190.93	19.49	1.85
DINxs	surface	-94.59	102.94	-2.54	1.81
	bottom	-94.90	56.59	-4.97	1.31

pH의 범위는 표층 6.12~8.86 (8.12±0.02), 저층 6.12~8.30 (7.99±0.02)로 표층이 저층에 비해 0.13 높게 나타났고, 정점 간 차이는 크지 않았다. DO의 범위(평균±표준오차)는 표층 4.66~14.99 mg/L (9.20±0.17 mg/L), 저층 0.00~13.68 mg/L (7.41±0.25 mg/L)로 표층이 저층에 비해 평균 1.80 mg/L 높았고, 표층은 내만에 비해 외만으로 갈수록 높은 경향을 보였으나, 저층의 경우 st. 2에서 가장 낮게 나타났다. COD의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.83~6.64 mg/L (2.70±0.09 mg/L), 저층 0.62~6.74 mg/L (2.22±0.07 mg/L)로 표층이 0.48 mg/L 높게 나타났고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다.

암모니아질소의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.00~62.67 μM (8.69±0.84 μM), 저층 0.21~81.82 μM (9.78±0.90 μM)로 저층이 표층에 비해 1.09 μM 높은 것으로 나타났고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 아질산질소의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.00~17.99 μM (1.10±0.17 μM), 저층 0.00~19.36 μM (1.03±0.15 μM)이고 st. 3을 제외하곤 표층이 저층에 비해 높았고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 질산질소의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.00~90.14 μM (9.86±1.21 μM), 저층

0.00~58.23 μM (7.72±0.80 μM)로 표층이 저층에 비해 2.14 μM 높은 것으로 나타났고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. DIN의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.22~133.34 μM (19.66±1.84 μM), 저층 0.54~86.83 μM (18.53±1.36 μM)로 암모니아질소 농도가 높은 st. 2와 아질산질소 농도가 높은 st. 3의 저층이 표층보다 높았으나, 전체적으로 표층이 저층에 비해 1.12 μM 높은 것으로 나타났고, 내만에서 외만으로 갈수록 더 낮은 것으로 나타났다.

DIP의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.00~7.38 μM (1.39±0.13 μM), 저층 0.00~9.32 μM (1.47±0.12 μM)로 저층이 표층에 0.08 μM 높았고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. DSi의 범위(평균±표준오차)는 표층 0.00~44.78 μM (12.05±1.11 μM), 저층 0.00~68.05 μM (17.55±1.50 μM)로 저층이 표층에 비해 5.50 μM 높은 것으로 나타났고, st. 2의 저층이 21.67 μM로 가장 높게 나타났다. 표층 SS와 chlorophyll-a의 범위(평균±표준오차)는 각각 0.60~34.40 mg/L (7.07±0.42 mg/L), 0.17~71.00 μg/L (11.37±0.79 μg/L)이고, 두 성분 모두 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. N/P 비(N/P ratio)의 평균은 표층 0.11~296.14 (26.70±3.16), 저층 2.75~190.93 (19.49±1.85)로 표층이 저층에 비해 7.21 높았고, 내만에서 외만으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였으나, 전 정점의 표·저층의 평균이 16 이상으로 마산만 해역은 용존무기질소 성분이 과잉인 것으로 나타났다.

전반적으로 수온, pH, DO, COD는 표층이 저층에 비해 높고, 염분은 표층이 저층에 비해 낮은 것으로 나타났다. 정점별로는 수온과 COD는 외만으로 갈수록 낮아지고, 염분, pH, DO는 외만으로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. 영양염의 경우, 암모니아질소, DIP, DSi는 저층이 표층에 비해 높았는데, 특히 st. 2의 저층의 경우 암모니아질소, DIP, DSi의 농도가 표층에 비해 더 두드러지게 높았고, 아질산질소, 질산질소는 표층이 저층에 비해 높았다. 또한 영양염 역시 정점별로 외만으로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

Chlorophyll-a, DIN 및 DIP의 표층수 평균은 각각 11.37 μg/L, 19.66 μM, 1.39 μM으로 마산만 표층수의 수질은 Wasmund *et al.* [2001]의 해역 영양상태 분류에 따라 부영양(eutrophic) 단계로 분류할 수 있다. 비슷한 시기 인근의 고성만 해역의 표층 chlorophyll-a, DIN 및 DIP 농도인 2.37 μg/L, 7.74 μM, 0.62 μM에 비해(Kwon[2010]), 그리고 한산거제만의 2.66 μg/L, 6.75 μM, 0.50 μM(Kwon *et al.* [2013])에 비해 chlorophyll-a는 5배 이상, DIN 및 DIP는 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

계절 변동 특성

Fig. 3에는 마산만의 표·저층 수질의 계절별 평균 변동을 나타내었다. 수온의 계절평균은 표층의 경우 동계인 2월의 표층이 5.57°C로 최소, 하계인 8월이 25.41°C로 최대였고, 저층은 2월이 5.56°C로 최소, 8월이 20.14°C로 최대였다. 염분은 표층의 경우 8월이 26.22 psu로 최소, 2월이 32.57 psu로 최대였고, 저층은 8월이 31.57 psu로 최소, 2월이 32.87 psu로 최대를 나타냈다. 수온과 염분은 하계인

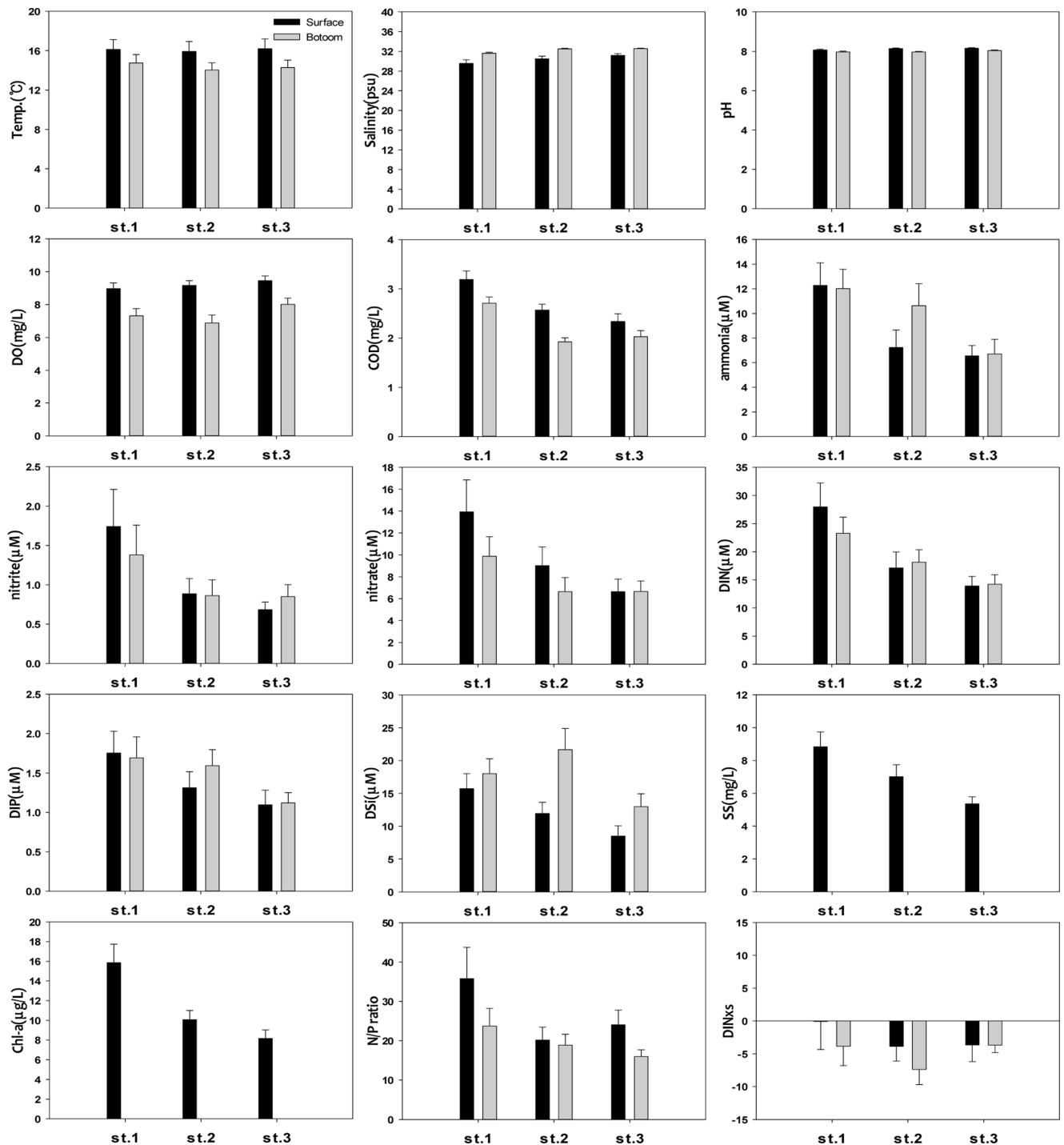


Fig. 2. The average variations of water parameters at each site Masan Bay from 2000 to 2012.

8월에 표·저층 차가 다른 계절에 비해 큰 것으로 나타났고, 동계에는 저온·고염, 하계에는 고온·저염의 전형적인 온대성 기후 변동 특성을 보였다.

pH는 표층의 경우 11월이 8.00로 최소, 8월이 8.25로 최대였고, 저층은 8월이 7.87로 최소, 5월이 8.07 최대였으며, 표층이 저층에 비해 높고, 특히 8월의 경우 표·저층 차가 0.38로 다른 계절에 비

해 차이가 비교적 크게 나타났다. 담수 유입이 많은 8월 표층에서 pH가 높은 것은 식물플랑크톤의 대량증식에 따른 호흡의 영향으로 추측되고, 저층 pH가 상대적으로 낮은 것은 저산소하에서 저층에서의 환원 때문이다(Sorensen[1978]).

DO는 표층의 경우 11월이 7.75 mg/L로 최소, 2월이 11.03 mg/L로 최대였고, 저층은 8월이 4.15 mg/L로 최소, 2월이 10.83 mg/L로 최

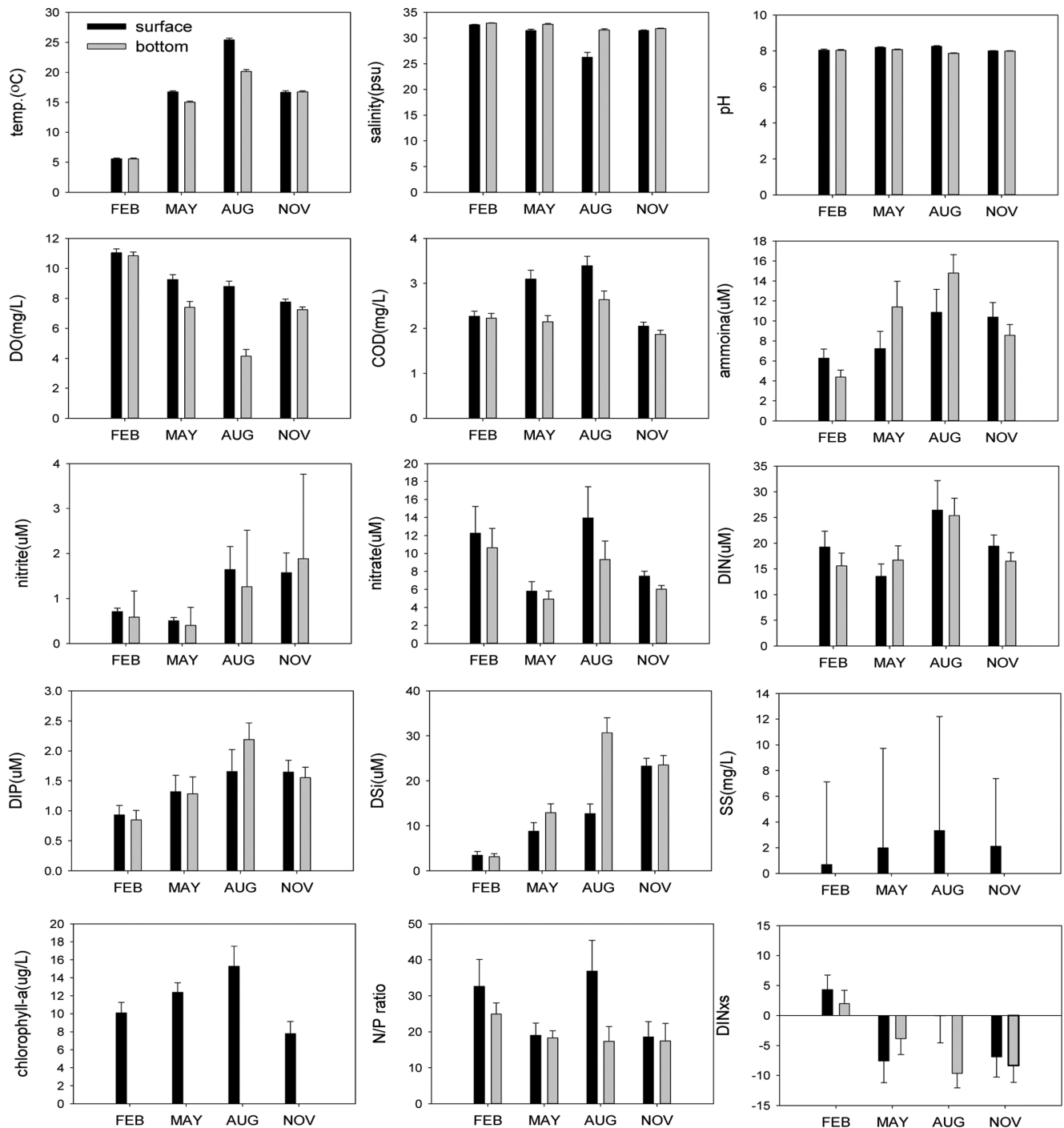


Fig. 3. The seasonal average variations of water parameters in Masan Bay during the period of 2000~2012.

대였다. 전 계절 동안 표층이 저층에 비해 높았고, 특히 5월부터 표·저층의 차이가 뚜렷하게 나타나기 시작하여, 8월에 표·저층 차이가 4.64 mg/L로 가장 컸다. 8월 저층의 낮은 DO는 고수온에 따른 산소포화율 감소와 수온약층 형성에 따른 산소의 공급 부족 때문으로 판단된다. COD는 표층의 경우 11월이 2.05 mg/L로 최소, 8월이 3.39 mg/L로 최대였고, 저층 또한 11월 1.87 mg/L로 최소, 8월이 2.64 mg/L로 최대를 나타내었다. 전 계절 표층이 저층보다 높게

나타났고, 5월과 8월의 표층이 저층에 비해 각각 0.94 mg/L, 0.75 mg/L 높게 나타났다. 우기인 8월에 담수유입에 따른 오염 부하와 함께 많은 영양염 유입과 고수온 환경 하에서 식물플랑크톤의 대량발생으로 인한 자생 COD의 증가가 COD 증가의 원인으로 보여진다.

암모니아질소는 표층의 경우 2월이 6.28 μM 로 최소, 8월이 10.87 μM 로 최대였고, 저층 역시 2월이 4.38 μM 로 최소, 8월이 14.79 μM 로 최

대였다. 2월과 11월은 표층이 저층에 비해 높고, 5월과 8월은 저층이 표층에 비해 높게 나타났다. 아질산질소는 표층의 경우 5월이 $0.50 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $1.65 \mu\text{M}$ 로 최대였고, 저층은 5월이 $0.40 \mu\text{M}$ 로 최소, 11월이 $1.88 \mu\text{M}$ 로 최대였다. 질산질소는 표층의 경우 5월이 $5.80 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $13.93 \mu\text{M}$ 로 최대였고, 저층은 5월이 $4.92 \mu\text{M}$ 로 최소, 2월이 $10.62 \mu\text{M}$ 로 최대였다. DIN은 표층의 경우 5월이 $13.53 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $26.44 \mu\text{M}$ 로 최대였고, 저층은 2월이 $15.59 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $25.36 \mu\text{M}$ 로 최대였다. 대체로 DIN은 하계인 8월에 최댓값을 보인 후 11월부터 점차 낮아져 동계인 2월을 거쳐 춘계인 5월에 최소 농도를 보여, 비슷한 시기 한산거제만이 11월에 DIN 농도가 최대인 것과 비교할 때 마산만은 한산거제만보다 하계 담수 유입의 영향을 더 강하게 받는 것으로 보였다(Kwon *et al.*[2013]).

DIP는 표층의 경우 2월이 $0.93 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월은 $1.65 \mu\text{M}$ 로 최대였고, 저층은 2월이 $0.85 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $2.19 \mu\text{M}$ 로 최대를 나타내었다. 계절별로 2월, 5월, 11월은 표층이 저층에 비해 약간 높았으나, 8월에는 표·저층 모두 최대였고, 저층이 표층에 비해 $0.54 \mu\text{M}$ 정도 높게 나타났다. DSi는 표층의 경우 2월이 $3.46 \mu\text{M}$ 로 최소, 11월이 $23.25 \mu\text{M}$ 로 최대였고, 저층은 2월이 $3.12 \mu\text{M}$ 로 최소, 8월이 $30.69 \mu\text{M}$ 로 최대를 나타내었다. DSi는 DIP와 함께 고수온기인 8월의 저층에서 최대 농도를 보였고, 이 시기 저층이 표층에 비해 $18.00 \mu\text{M}$ 이나 높게 나타나, 농도가 가장 낮았던 2월 저층에 비해 10배 가량 높은 농도를 보였다. 이는 8월 고수온기 빈산소 하에서 퇴적물의 환원 환경에서 DIP와 DSi의 공급이 활발했기 때문인 것으로 보여진다(Danielsson[2014]; Lehtoranta and Heiskanen[2003]).

표층 chlorophyll-a는 전 계절에서 높은 농도를 보였고, 11월에 $7.78 \mu\text{g/L}$ 로 최소, 8월에 $15.27 \mu\text{g/L}$ 로 최대치를 보였는데, 영양염의 농도가 상대적으로 높고, 고수온기인 8월에 식물플랑크톤의 증식이 가장 활발한 것으로 보인다.

N/P ratio는 표층의 경우 5월이 19.00으로 최소, 8월이 36.86으로 최대였고, 저층은 8월이 18.32로 최소, 2월이 24.94로 최대를 나타

났다. 전 계절 N/P ratio가 16 이상으로 DIP가 식물플랑크톤 성장의 제한인자이나, DINxs 값이 양(+)인 2월에만 DIP가 제한 인자이고, 5월, 8월, 11월은 음(-)의 값으로 DIP가 과잉 공급되고 있는 것으로 나타났다(Wong *et al.*[1998]). 또한 chlorophyll-a, DIN 및 DIP를 기준으로 한 마산만 해역의 계절별 영양상태는 전 계절이 부영양(eutrophic) 단계로 나타났다(Wasmund *et al.*[2001]).

상관 및 요인분석

수질성분간의 상관관계를 파악하기 위한 표·저층 수질 성분에 대한 상관분석 결과를 Table 2, Table 3에 나타내었다.

표층의 경우 수온은 염분 및 DO와 음(-)의 상관관계, COD 및 DSi와는 양(+)의 상관관계를 보였다. 염분은 수온, pH, COD, 무기질소, DSi 및 chlorophyll-a와 모두 음(-)의 상관관계를 보였고, pH는 염분, 암모니아질소, 질산질소, DIN 및 DIP와 음(-)의 상관관계, 수온, DO, COD, SS 및 chlorophyll-a와 양(+)의 상관관계를 보였다. DO는 온도에 따른 산소포화도 감소에 따라 수온과 음(-)의 상관관계를 보였고, pH, chlorophyll-a와는 양(+)의 상관관계를 보였다. 이는 식물플랑크톤 증가와 관련한 특성으로 판단된다. COD는 염분과 음(-)의 상관관계로 담수의 영향을 받고 있음을 보였고, 수온, SS 및 chlorophyll-a등과 양(+)의 상관관계를 보여 식물플랑크톤의 증식에 따른 내부생산된 자생 COD가 상당부분 차지하는 것으로 판단된다. DIN은 염분과 음(-)의 상관관계를 나타내어 담수유입의 영향을 받는 것으로 판단된다. 암모니아질소는 pH 및 DO와 음(-)의 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다. DIP는 DIN과는 달리 염분과는 상관관계가 없는 것으로 나타났고, pH와 DO와 음(-)의 상관관계를 보여 빈산소 하에서 양(+)의 상관관계를 보인 암모니아질소와 DSi와 함께 농도가 높아지는 것으로 판단된다(Danielsson[2014]). DSi는 수온과 양(+)의 상관관계를 보여 수온이 높으면 상승하고, 용존산소와 음(-)의 상관관계를 보여 암모니아질소, DIP와 마찬가지로 저산소하에서 높아지는 것으로 판단된다(Lehtoranta and Heiskanen[2003]). chlorophyll-a는 염분과 음(-)의 상관관계를 보였

Table 2. The correlation coefficients of surface water parameters by Spearman's correlation analysis

	temp.	salinity	pH	DO	COD	ammonia	nitrite	nitrate	DIN	DIP	DSi	SS	chl-a
temp.	1	-0.491**	0.357**	-0.383**	0.462**	ns	ns	ns	ns	ns	0.331**	ns	ns
salinity		1	-0.224*	ns	-0.393**	-0.222*	-0.237*	-0.597**	-0.494**	ns	-0.346**	ns	-0.251**
pH			1	0.420**	0.496**	-0.273**	ns	-0.205*	-0.265**	-0.397**	ns	0.206*	0.403**
DO				1	0.249**	-0.409**	-0.285**	ns	-0.361**	-0.474**	-0.534**	ns	0.269**
COD					1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0.409**	0.566**
ammonia						1	0.520**	0.400**	0.828**	0.619**	0.360**	ns	ns
nitrite							1	0.356**	0.596**		0.340**	ns	ns
nitrate								1	0.838**	0.296**	0.281**	ns	ns
DIN									1	0.520**	0.395**	ns	ns
DIP										1	0.370**	ns	ns
DSi											1	ns	ns
SS												1	0.310**
chl-a													1

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ (two tails); ns: non-significant.

Table 3. The correlation coefficients of bottom water parameters by Spearman's correlation analysis

	temp.	salinity	pH	DO	COD	ammonia	nitrite	nitrate	DIN	DIP	DSi
temp.	1	-0.450**	-0.400**	-0.759**	ns	0.331**	ns	ns	ns	0.420**	0.570**
salinity		1	ns	0.302**	-0.407**	ns	ns	ns	ns	ns	-0.388**
pH			1	0.516**	ns	-0.375**	ns	ns	-0.299**	-0.484**	-0.375**
DO				1	ns	-0.602**	ns	ns	-0.411**	-0.682**	-0.768**
COD					1	ns	ns	ns	ns	-0.278**	ns
ammonia						1	0.447**	ns	0.765**	0.654**	0.488**
nitrite							1	0.221*	0.610**	ns	ns
nitrate								1	0.677**	ns	ns
DIN									1	0.480**	0.350**
DIP										1	0.630**
DSi											1

*: $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ (two tails); ns: non-significant.

고, 무기영양염과는 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지 않았다. 이는 chlorophyll-a가 담수의 영향을 받지만, 표층 수계 내의 영양염 농도가 chlorophyll-a와 유의한 상관을 보일 만큼 제한되지 않고 있다는 것을 나타낸다. 앞서 계절변동 특성에서 밝힌 것처럼 마산만은 전 계절 동안 N/P ratio가 16 이상이나 2월만 DIP의 제한을 받고, 나머지 계절은 DIP 역시 과잉 공급되고 있는 부영양(eutrophic) 단계의 해역임을 확인해 주고 있다.

저층의 경우 수온은 염분, pH 및 DO와 음(-)의 상관관계, 암모니아질소, DIP 및 DSi와는 양(+)의 상관관계를 보였다. 염분은 수온, COD 및 DSi와 음(-)의 상관관계, DO와 양(+)의 상관관계를 보였다. pH는 수온, 암모니아질소, DIN, DIP 및 DSi와 음(-)의 상관관계, DO와 양(+)의 상관관계를 보였다. DO의 경우 수온과의 음(-)의 상관관계가 표층에 비해 훨씬 높고, 염분은 표층과는 달리 양(+)의 상관관계를 보였고, 암모니아질소, DIP 및 DSi와는 표층보다 높은 음(-)의 상관관계를 보였다. COD는 염분과 DIP와 음(-)의 상관관계를 보여 담수의 영향을 받고 있음을 나타내었다. DIN은 pH 및 DO와 음(-)의 상관관계를 보였으나, 표층과 달리 염분과의 상관관계는 없는 것으로 나타나, 저층 DIN은 표층과는 달리 담수 유입의 영향이 적은 것으로 판단된다. DIP는 수온과 양(+)의 상관관계 이었고, pH와 DO와 음(-)의 상관관계를 보였다. 따라서 고수온 저산소 환경에서 양(+)의 상관관계를 보인 암모니아질소 및 DSi와 함께 농도가 상승하는 것으로 판단된다. DSi는 표층과 마찬가지로 수온이 높으면 상승하고, 담수의 영향을 받는 것으로 나타났으나, 용존산소와 높은 음(-)의 상관관계를 보여 저산소 환경의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

상관분석 결과에 따른 변수들 간의 상호 관계를 명확하게 파악하기 위하여, 변수들의 공통차원을 설명할 수 있는 통계기법인 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 요인분석에 사용된 요인추출 방법은 주성분분석(PCA, principal component analysis)을 이용하였고, 고유값(eigenvalue)이 1 보다 큰 요인을 추출하여, 직각회전 방법인 varimax로 요인 회전하였다.

표층에 대한 요인분석 결과 4개의 요인(factor)이 추출되었고, 누적 적재값(cumulative %)은 72.34%로 나타났다. 제 1요인(factor 1)은

Table 4. The principal components of factor analysis and the eigenvalues and cumulative proportions of the surface water at the study area

	Factor			
	1	2	3	4
DIN	0.909	0.389	0.001	0.022
nitrate	0.841	0.140	0.067	-0.017
nitrite	0.681	0.039	-0.100	0.156
salinity	-0.655	0.238	-0.276	-0.426
ammonia	0.638	0.562	-0.051	0.028
DIP	0.237	0.799	-0.006	0.069
pH	-0.042	-0.653	0.431	0.214
DO	-0.116	-0.606	0.308	-0.603
SS	-0.098	0.221	0.801	-0.052
COD	0.083	-0.273	0.770	0.277
chlorophyll-a	0.072	-0.244	0.716	0.029
temperature	0.040	-0.141	0.195	0.904
DSi	0.279	0.450	0.076	0.579
Eigenvalue	3.01	2.38	2.17	1.85
Variance %	23.12	18.32	16.65	14.25
Cumulative %	23.12	41.43	58.09	72.34

*extraction method: Principal Component Analysis, Kaiser varimax 7 rotations

DIN, 질산질소, 아질산질소, 염분 및 암모니아질소였고, 제 2요인(factor 2)는 DIP, pH 및 DO였고, 제 3요인(factor 3)은 SS, COD 및 chlorophyll-a였고, 제 4요인(factor 4)는 수온과 DSi가 추출되었다. 요인별 적재값(cumulative %)은 factor 1이 23.12%, factor 2가 18.32%, factor 3이 16.65%, 그리고 factor 4가 14.25%로 각각 나타났다(Table 4).

저층에 대한 요인분석 결과 4개의 요인(factor)이 추출되었고, 누적 적재값(cumulative %)은 78.52%로 나타났다. 제 1요인(factor 1)은 DO, DIP, DSi, 수온, pH 및 암모니아질소였고, 제 2요인(factor 2)는 질산질소와 DIN이었고, 제 3요인(factor 3)은 아질산질소였고, 제 4요인(factor 4)는 COD와 염분이 추출되었다. 요인별 적재값(cumulative %)은 factor 1이 35.07%, factor 2가 14.94%, factor 3이 14.88%, 그리고 factor 4가 14.64%로 각각 나타났다(Table 5).

Table 5. The principal components of factor analysis and eigenvalues cumulative and proportions of the bottom water at the study area

	Factor			
	1	2	3	4
DO	-0.912	0.024	-0.147	-0.115
DIP	0.839	0.193	0.029	-0.246
DSi	0.817	-0.050	0.164	0.116
temperature	0.727	-0.229	0.104	0.412
pH	-0.666	-0.358	0.319	-0.063
ammonia	0.651	0.235	0.512	-0.147
nitrate	-0.065	0.910	0.125	0.077
DIN	0.382	0.710	0.576	-0.038
nitrite	0.045	0.151	0.910	0.048
COD	-0.157	0.109	-0.133	0.832
salinity	-0.283	0.023	-0.143	-0.790
Eigenvalue	3.86	1.64	1.64	1.61
Variance %	35.07	14.94	14.88	14.64
Cumulative %	35.07	50.00	64.86	78.52

*extraction method : Pricipal Compnent Analysis, Kaiser varimax 6 rotations

제 1요인(factor 1)은 표층의 경우 DIN, 질산질소, 아질산질소, 염분 및 암모니아질소로 담수유입에 따른 질소계 무기영양염의 외부 유입을 나타내었고, 저층은 DO, DIP, DSi, 수온, pH 및 암모니아질소와 같이 용존산소의 변동과 이에 따른 pH, 용존무기인 및 규산규소의 변동이 주요 요소로 나타나, 하계 고수온기 빈산소 하의 퇴적물 환원 조건에서 DIP, DSi 및 암모니아질소의 용출이 주요 요인(factor)인 것으로 보여진다. 제 2요인(factor 2)은 표층의 경우 DIP, pH 및 DO로 나타났고, 저층은 질산질소와 DIN으로 나타나, 표층의 제 1요인이 염분과 무기질소인 것과 비교하면 저층의 질산질소의 변동이 표층과 다른 특성을 나타낸다고 판단된다. 제 3요인(factor 3)은 표층의 경우 SS, COD 및 chlorophyll-a로 주로 오염부하 및 내부생산과 관련된 성분들로 특히, COD가 염분과 같은 요인이 되지 않은 것으로 보아 식물성플랑크톤의 대량번식으로 인한 자생 오염부하가 주요 요인인 것으로 보여 진다. 저층의 경우 아질산질소의 변동이 주요 요인인 것으로 나타났다. 제 4요인(factor 4)는 표층의 경우 수온과 DSi로 나타나, 표층 DSi의 변동은 주로 담수유입이나 용존산소의 영향보다는 수온에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다, 저층은 COD와 염분으로 나타나, 저층 COD는 염분과 음(-)의 상관관계로 담수의 영향이 큰 것으로 판단된다.

따라서 상관분석과 요인분석을 종합하면 마산만은 표층의 경우 담수유입에 따른 용존무기질소와 내부생산이 주 요인이고, 저층은 용존산소의 변동과 이에 따른 DIP, DSi의 변동이 주 요인인 것으로 판단된다.

장기 변동 특성

세 정점의 표·저층 수질에 대하여 시간적 변동 추세를 파악하기 위하여 성분별 연도별 평균 및 표준오차의 변동 경향을 Fig. 4, 5에 나타내었다.

수온의 경우 정점별 표·저층에 따른 연도별 변동은 크지 않았다. 염분의 경우 2005년도 표층이 상대적으로 낮았고, 저층은 거의 일정한 연 평균 농도를 보였다. pH의 경우 st. 1에서 2003년 표·저층이 평균에 비해 낮았고, 표층은 약간 상승하는 경향을 보였고, 저층은 연평균 변동경향이 없는 것으로 나타났다. DO는 표층의 경우 세 정점 모두 뚜렷한 상승 경향을 보였고, 저층의 경우 정점별 평균 농도의 차가 크고 연평균 농도의 변동 경향은 뚜렷하지 않았다. COD의 경우 표층의 경우 st. 1은 증가하는 경향을 보였고, st. 2는 연변동이 뚜렷하지 않았고, st. 3은 감소하는 경향을 보였다. 저층의 경우 정점별 연평균의 차이가 뚜렷하였고, 연평균의 변동은 적은 것으로 나타났다. 암모니아질소, 아질산질소, 질산질소, DIN 및 DIP의 표·저층 연도별 변동이 2007년을 기점으로 감소하는 경향을 보였다. 이에 반해 DSi는 연도별 변동보다 정점별 변동이 더 큰 것으로 나타났다, 특히 2011년의 저층에서 상대적으로 높은 경향을 보였다. chlorophyll-a는 st. 1 표층의 경우, 2006년과 2009년이 평년에 비해 높은 경향을 보였고 대체로 약간 상승하는 경향을 보였다.

이상과 같이 증가 또는 감소의 경향이 뚜렷한 수질 성분의 경우 2007년을 전·후하여 수질의 농도가 증가 또는 감소하는 경향이 나타나, 2007년도 ‘총량규제’ 실시가 수질의 연평균 변동에 어떤 영향을 주었는지 알기 위해, ‘총량규제’ 실시 이전(2000~2006년)과 이후(2007~2012년)의 각 성분의 평균 농도에 대한 통계적 검정(독립표본 t-test)을 하였다(Table 6).

독립표본 t-test 결과 pH 및 DO는 표층, COD는 저층, 염분, 무기질소성분 및 DIP는 표·저층에서 통계적으로 유의한 농도 평균의 차이가 있는 것으로 나타났다. 염분의 경우 표층은 2.05 psu, 저층은 0.38 psu 증가하여, 증가율이 각각 6.9%, 1.2%였다. 표층 pH의 경우 0.09 증가하여, 증가율이 1.1%였다. 표층 DO는 1.60 mg/L 증가하여, 증가율은 18.9%였다. 저층 COD는 0.33 mg/L 감소하여, 감소율은 13.9%로 나타났다. 용존무기질소 성분은 표·저층 모두에서 크게 감소하였는데 암모니아질소의 경우 표·저층 각각 8.87 μM , 8.29 μM 감소하여 감소율이 69.4%, 60.9%였다. 아질산질소는 표·저층 각각 1.26 μM , 1.00 μM 감소하여 감소율 74.9%, 67.2%였다. 질산질소는 12.86 μM , 9.13 μM 감소하여, 감소율은 81.4%, 76.5%였다. 무기질소성분의 전체 합인 DIN은 표·저층 각각 22.99 μM , 18.42 μM 감소하여 감소율은 76.0%, 68.1%로 나타났다. DIP의 경우 표·저층 각각 1.64 μM , 1.40 μM 감소하여, 감소율은 각각 76.6%, 66.2%로 나타났다.

이상과 같이 표층 DO의 증가, 저층 COD의 감소, 그리고 DIN 및 DIP의 농도의 뚜렷한 감소를 보면, 앞서 보고된 1995년 하수처리장 준공 및 2000년 하수처리장의 용량 증설에 따른 DIN 감소(Cho *et al.*[2000]; Kim *et al.*[2012])와 함께 2007년 ‘총량규제’ 실시 이후 마산만의 수질이 크게 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 ‘특별관리해역’ 지정에 따른 ‘총량규제’와 같은 수질개선 프로그램이 마산만 해역의 오염물질 저감 및 수질 향상에 긍정적으로 기여했음을 알 수 있다.

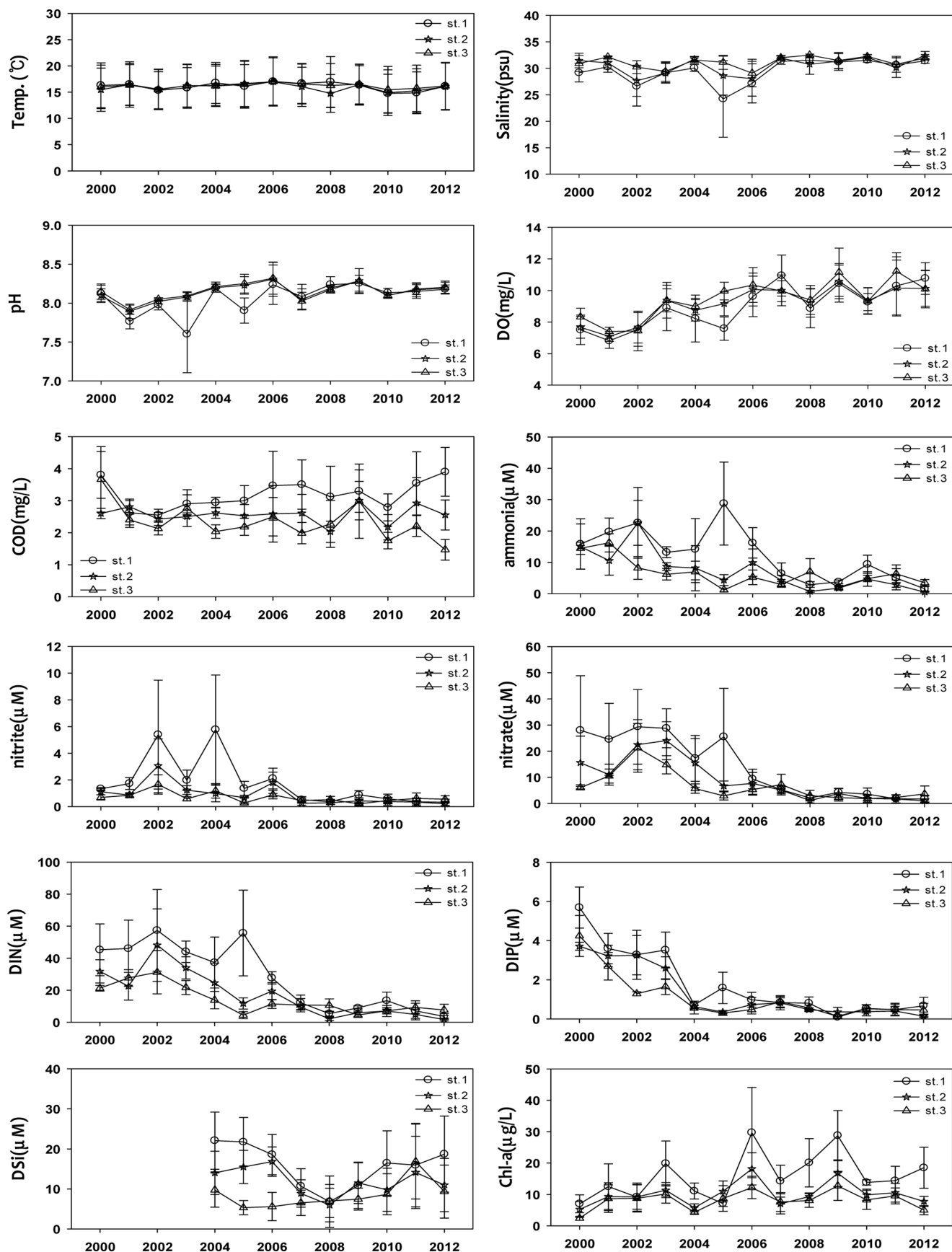


Fig. 4. Annual variation of surface water parameters at each site in Masan Bay from 2000 to 2012. Error bars represent one standard error.

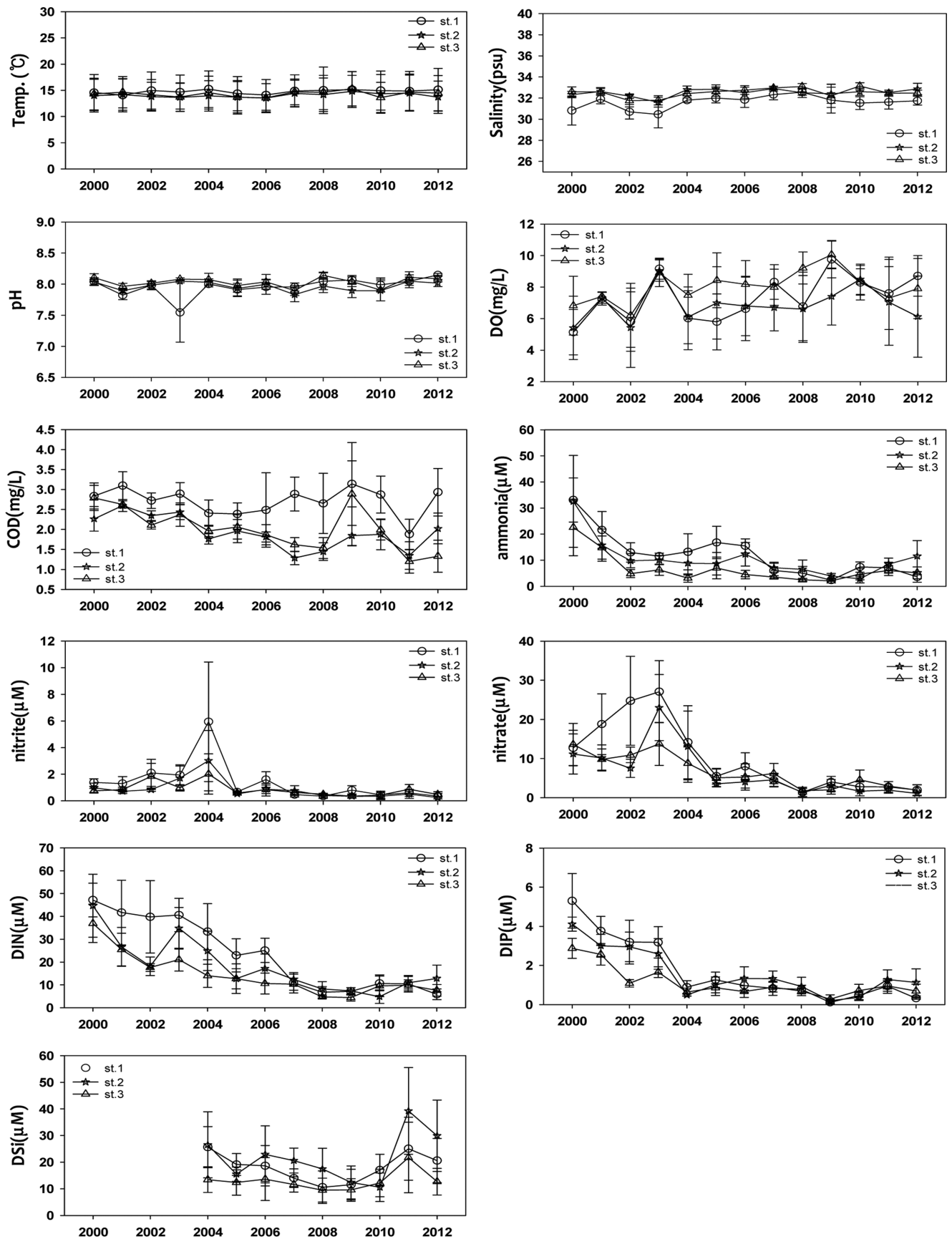


Fig. 5. Annual variation of bottom water parameters at each site in Masan Bay from 2000 to 2012. Error bars represent one standard error.

Table 6. The pre-post difference of t-test result on the water quality after TMDL (Total Maximum Daily Load) in Masan bay in 2007

parameter	layer	t-value	p	pre (a)		post (b)		difference (b-a)		
				mean	se	mean	se	mean	se	(%)
temperature (°C)	s	0.31	0.754	16.25	0.78	15.89	0.85	-0.36	1.16	-2.2
	b	-0.51	0.609	14.15	0.58	14.61	0.70	0.46	0.90	3.3
salinity (psu)	s	-3.28	0.001	29.47	0.54	31.51	0.23	2.05**	0.62	6.9
	b	-2.03	0.044	32.04	0.13	32.43	0.13	0.38*	0.19	1.2
pH	s	-2.04	0.043	8.08	0.04	8.17	0.02	0.09*	0.04	1.1
	b	-0.87	0.387	7.97	0.03	8.00	0.02	0.03	0.04	0.4
DO (mg/L)	s	-4.89	0.000	8.47	0.21	10.06	0.25	1.60**	0.33	18.9
	b	-1.91	0.058	6.97	0.34	7.92	0.37	0.95	0.50	13.7
COD (mg/L)	s	0.23	0.817	2.72	0.11	2.68	0.16	-0.04	0.18	-1.6
	b	2.33	0.021	2.37	0.07	2.04	0.13	-0.33*	0.14	-13.9
ammonia (uM)	s	5.78	0.000	12.78	1.36	3.91	0.49	-8.87**	1.53	-69.4
	b	4.94	0.000	13.61	1.47	5.32	0.57	-8.29**	1.68	-60.9
nitrite (uM)	s	3.75	0.000	1.69	0.31	0.42	0.06	-1.26**	0.34	-74.9
	b	3.41	0.001	1.49	0.27	0.49	0.05	-1.00**	0.29	-67.2
nitrate (uM)	s	5.86	0.000	15.80	2.00	2.94	0.42	-12.86**	2.19	-81.4
	b	6.35	0.000	11.94	1.30	2.80	0.34	-9.13**	1.44	-76.5
DIN (uM)	s	7.16	0.000	30.27	2.90	7.27	0.76	-22.99**	3.21	-76.0
	b	8.03	0.000	27.04	2.04	8.61	0.70	-18.42**	2.30	-68.1
DIP (uM)	s	7.15	0.000	2.15	0.21	0.50	0.06	-1.64**	0.23	-76.6
	b	6.54	0.000	2.11	0.19	0.72	0.08	-1.40**	0.21	-66.2
DSi (uM)	s	1.48	0.142	14.36	1.73	10.90	1.41	-3.46	2.34	-24.1
	b	0.51	0.612	18.63	2.38	17.01	1.91	-1.62	3.19	-8.7
SS (mg/L)	s	-1.41	0.162	6.52	0.51	7.71	0.70	1.19	0.85	18.3
	b									
chlorophyll-a (µg/L)	s	-1.13	0.259	10.54	1.14	12.34	1.09	1.80	1.59	17.1
	b									

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$ (two tails), layer s: surface water; layer b: bottom water.

4. 요 약

2000~2012년 동안 마산만 해역의 COD 평균 농도는 표·저층 각각 2.70 mg/L, 2.22 mg/L, DIN은 표·저층 각각 19.66 µM, 18.53 µM, DIP는 표·저층 각각 1.39 µM, 1.47 µM였으며, chlorophyll-a의 표층 평균은 11.37 µg/L로 나타났다.

마산만 표층수의 수질은 Wasmund *et al.*[2001]의 해역 영양상태 분류에 따라 부영양 (eutrophic) 단계로 분류할 수 있다. 비슷한 시기 인근의 고성만 및 한산거제만에 비해 chlorophyll-a는 5배 이상, DIN 및 DIP는 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

마산만의 수온 및 염분의 계절별 변동은 동계에는 저온·고염, 하계에는 고온·저염의 전형적인 온대성 기후변동 특성을 보였다. DIN은 담수의 유입의 영향을 크게 받으며, 계절적 변동은 표층의 경우 강수량이 많은 하계인 8월부터 증가하기 시작하여 11월에 최대치를 보인 후, 동계인 2월에 감소하여 춘계인 5월에 최소 농도를 보였다. DIP와 DSi는 8월 저층에서 최대 농도를 보여, 담수유입의 영향보다는 고수온·빈산소 환경에서 퇴적물로부터의 DIP와 DSi의 용출로 인한 공급이 활발하였음을 알 수 있었다.

요인분석 결과 마산만 해역 표층의 경우 담수유입에 따른 무기

질소의 유입, 산소변동에 따른 DIP의 변동, 내부생산이 주요 요소였고, 저층은 용존산소의 변동과 이에 따른 DIP, DSi 및 암모니아 질소와 같은 영양염의 변동이 주요 요소인 것으로 나타났다.

2007년 이후 마산만 표층 DO의 증가, 저층 COD의 감소, 그리고 DIN 및 DIP의 농도의 뚜렷한 감소를 보여, 2007년 ‘총량규제’와 같은 수질개선관련 프로그램이 마산만 해역의 오염물질 저감 및 수질 향상에 긍정적으로 기여했음을 알 수 있다.

마산만은 COD를 대상으로 한 제 1차 연안오염총량관리제 실시(2007~2011년) 이후, 현재 인(P)을 대상으로 제2차 연안오염총량관리(2012~2017년)를 시행 중이다. 따라서, 향후 이러한 일련의 수질개선 노력들이 어떤 영향을 미치고 있는지, 지속적인 모니터링 실시하여, 과학적 수질관리 계획을 수립하여야 한다.

후 기

이 연구는 국립수산과학원(어장환경모니터링, RP-2014-ME-023)의 지원에 의해 수행되었습니다. 자료의 분석 및 수집을 위해 노력해 주신 국립수산과학원 관련 연구원들께 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

References

- [1] NFRDI, 2013, Management manual of the marine environmental around aquaculture area, 1-15(국립수산물과학원, 2013, 어장환경통합모니터링 운영지침, 1-15).
- [2] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010, Standard method of oceanic environment(국토해양부, 2010, 해양환경공정시험기준, 3-189).
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012, The introduction and enforcement of the land pollution point management and estuary total maximum daily load management(국토해양부, 2012, 육상오염원관리 및 연안오염총량관리제 도입·시행, 25-26).
- [4] Cho, B.H. and K.C. Yang, 2012, "A Study on the total pollutant load management of Masan Bay using GIS technique", Journal of Korean Wetlands Society, Vol. 14, No. 2, 89-99.
- [5] Cho, H.Y., J.W. Chae, and S.T. Jeong, 2000, "Pollutant budget change to construction of water treatment plant in Masan Bay", Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 12, No. 3, 149-155.
- [6] Cho, H.Y. and J.W. Chae, 1998, "Analysis on the characteristics of the pollutant load in Chinhae-Masan Bay", Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 10, No. 3, 132-140.
- [7] Cho, K.J., M.Y. Choi, S.K. Kwak, S.H. Im, D.Y. Kim, J.G. Park, and Y.E. Kim, 1998, "Eutrophication and seasonal variation of water quality in Masan-Jinhae Bay", 「The Sea」 Journal of the Korea Society of Oceanography, Vol. 3, No. 4, 193-202.
- [8] Danielsson, Å, 2014, "Influence of hypoxia on silicate concentration in the Baltic Proper(Baltic Sea)", Boreal Environment Research, Vol. 19, online preprint.
- [9] 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.
- [10] Kim, D., H.W. Choi, K.H. Kim, J.H. Jeong, S.H. Baek, and Y.O. Kim, 2011, "Statistical analysis on the quality of surface water in Jinhae Bay during winter and spring", Ocean and Polar Research, Vol. 33, No. 3, 291-301.
- [11] Kim, D., C.W. Lee, S.H. Choi, and Y.O. Kim, 2012, "Long-term changes in water quality of Masan Bay, Korea", Journal of Coastal Research, Vol. 28, No. 4, 923-929.
- [12] Kwon, J.N., J.G. Kim, and T.S. Ko, 2001, "The estimation of water quality changes in the Kuem River Estuary by the dyke gate operation using long-term data", J. Korean Fish. Soc, Vol. 34, No. 4, 348-354.
- [13] Kwon, J.N., Y.C. Park, and K.H. Eom, 2013, "The characteristic of long term variation of the water quality from Hansan-Geoje bay, Korea", Journal of the Korean Society for Marine Environmental and Energy, Vol. 16, No. 3, 189-201.
- [14] Kwon, J.N., 2010, "Characteristic of long term variation of the water quality the waters of Goseong bay", Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol. 13, No. 4, 279-287.
- [15] Park, S.Y., H.C. Kim, P.J. Kim, G.S. Park, J.Y. Ko, S.B. Jeon, S.M. Lee, and J.S. Park, 2009, "Long-term variation and characteristics of water quality in the Garolim coastal areas of Yellow Sea, Korea", Journal of the Korean Society of Marine Environmental & Safety, Vol. 15, No. 4, 315-328.
- [16] Sorensen, J., 1978, "Capacity for denitrification and reduction of nitrate to ammonia in a coastal marine sediment", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 3, No. 2, 301-305.
- [17] Wong, G.T.F., G-C. Cong, K-K. Kiu, and S-C. Pai, 1998, "Excess Nitrate' in the East China Sea", Estuarine, Coastal Shelf Science, Vol. 46, 411-418.
- [18] Wasmund, N., A. Andrushaitis, E. Łysiak-Pastuszek, B. Müller-Karulis, G. Nausch, T. Neumann, H. Ojaveer, I. Olenina, L. Postel, and Z. Witek, 2001, "Trophic status of the South-Eastern Baltic Sea: A comparison of coastal and open areas", Estuarine, Coastal Shelf Science, Vol. 53, 849-864.

Received 29 May 2014

1st Revised 4 July 2014, 2nd Revised 19 August 2014

Accepted 19 August 2014