



Original Article

연안오염총량관리제도 도입에 따른 마산만 해양환경 변화

박미옥^{1,3} · 이용우^{1,†} · 박준건¹ · 김성길¹ · 김성수² · 이석모³

¹해양환경공단 해양수질팀

²해양환경공단 제주지사

³부경대학교 생태공학과

Changes in Water Quality in Masan Bay after the Introduction of the Total Pollution Load Management System

Mi-Ok Park^{1,3}, Yong-Woo Lee^{1,†}, Jun-Kun Park¹, Seong-Gil Kim¹, Seong-Soo Kim², and Suk-Mo Lee³

¹Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

²Jeju Branch, Korea Marine Environment Management Corporation, Jeju 63280, Korea

³College of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

요 약

1997년부터 2016년까지의 주요 해양환경 인자 자료를 이용하여 2007년 마산만 연안오염총량관리제도 도입 전후의 수질 변화 양상을 살펴보았다. 오염지표로 주로 사용되는 COD, TN, TP의 농도는 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, 육상으로부터 오염부하량이 증가하는 8월에 다른 조사시기에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 표층수 중 COD, TN, TP의 연평균 농도는 마산만 연안오염총량관리제도의 시행 이후 각각 20%, 55%, 55% 감소한 것으로 나타났다. 용존무기질소(DIN), 용존무기인(DIP)의 연평균 농도는 총량관리제도 시행 이전에 비해 각각 77%, 81% 감소한 것으로 나타났다. 따라서 마산만 연안오염총량관리제도 시행 이후 마산만 수질이 상당히 개선되고 있는 것으로 판단된다. 반면 마산만 내측 COD 농도는 2005년 이후 8월에 증가한 것으로 나타났다. 마산만 특별관리해역의 수질 개선을 위해서는 마산만 외측보다는 내측에 대한 오염 원인 파악 및 집중적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract – Long-term variations of environmental parameters in seawater of Masan Bay from 1997 to 2016 were studied to understand changes in water quality from before to after the introduction of the total pollution load management system (TPLMS) in 2007. The concentrations of COD, TN, and TP, which are mostly used as pollution indices, were at their highest levels in August when the pollution load from land runoff increased, and consistently declined from the beginning of the investigation in Masan Bay. The average annual concentrations of COD, TN, TP, dissolved inorganic nitrogen (DIN), and dissolved inorganic phosphorus (DIP) in surface seawater decreased by 20%, 55%, 55%, 77%, and 81%, respectively, when compared to those prior to the introduction of the TPLMS in Masan Bay. Therefore, water quality in Masan Bay has improved considerably since the TPLMS was implemented. On the other hand, COD concentrations in the inner part of Masan Bay have increased in August since 2005. In order to improve the quality of seawater in Masan Bay special management area, it is necessary to identify the cause of contamination and intensive management of the inner part of Masan Bay.

Keywords: Masan Bay(마산만), Total pollution load management system(오염총량관리제도), Water quality(수질)

1. 서 론

마산만은 100만 이상의 인구를 가진 창원시로 둘러싸인 반폐쇄성 내만으로 1970년 이후 대규모 자유무역과 산업단지들이 들어서면서 오염부하량이 계속적으로 증가되어왔다. 마산만은 인위적인

오염물질의 지속적인 공급으로 해양오염 뿐만 아니라 적조발생 및 저층 빈산소수괴와 같은 부차적인 환경 문제들이 발생하고 있다 (Lee and Min[1990]; Yoo[1991]; Yim *et al.*[2005]).

마산만으로 공급되는 오염물질은 주로 인근 하천(삼호-산호천, 창원천 등) 이나 해양방류구(덕동, 진해 하수종말처리장) 그리고 퇴적물로부터의 용출에 의해서 공급되는 것으로 알려져 있으며(Cho

[†]Corresponding author: wblusea@koem.or.kr

and Chae[1998]; Park *et al.*[2009]), Cho *et al.*[1998]은 진해만 및 마산만으로 유입되는 오염부하량 중 약 80~90%가 마산, 창원 유역으로부터 공급되는 것으로 보고하였다. Lee *et al.*[2009]은 마산만 내에서 해저지하수를 통한 영양염의 공급 또한 상당량 기여하는 것으로 보고하였다. 마산만으로 유입된 오염물질은 마산만의 해수 유동 및 외해수와의 교환이 원활하지 못하여 오염이 더욱 가중되는 것으로 나타났다(Shin *et al.*[2004]). 오염물질의 지속적인 공급은 마산만과 진해만 내 봄과 여름철 저층 빈산소수괴를 야기시키고 빈산소수괴는 6월 초부터 시작하여 10월 중순까지 지속되는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*[2012]). 빈산소수괴의 형성은 마산만 내에 서식하는 유영·저서 생물의 호흡이나 생리작용에 직접적인 영향을 미치고 기초생산자인 식물플랑크톤의 성장 및 종조성에도 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*[2012]). 마산만 내 유해성조류대번식은 단일종(규조류 또는 와편모조류) 또는 혼합종들에 의해서 1980년대까지는 주로 여름(7~8월)에 집중되었으나, 최근에는 매년 3월부터 11월까지 발생하고 있다(Kim and Shin[1997]; Cho *et al.*[1998]; Kwak *et al.*[2001]). 1980년 이전에 유해성조류대번식은 주로 만 안쪽에서만 발생하여 왔으나, 1980년대 이후 만 바깥 쪽에서도 빈번하게 발생하고 있다(Yoo, 1991; Cho *et al.*[1998]). 이러한 유해성조류대번식은 번성 후 사멸하고 사체가 분해되는 과정에서 저층 빈산소수괴를 더욱 심화시키고 있다(NFRDI[2009]).

Lee and Min[1990]은 마산만 내에서 1983년부터 1988년까지 마산만 내 오염 지표로 이용되는 주요 인자들에 대한 장기변화 양상을 분석하였으며, 1980년대 중반 이후 해수 중 총질소와 용존무기인의 농도가 지속적으로 증가하는 양상을 보였으며, 화학적산소요구량(COD)은 국내의 오염이 진행되고 있는 주요 해역인 부산연안, 울산연안, 진해만에 비해 약 2~3배 높은 수준으로 나타났다.

마산만 내 해양환경 오염이 심화됨에 따라 1975년에는 가포해수욕장 폐쇄, 1979년에는 어패류 채취금지 등의 조치가 취해졌다. 1982년에는 육역을 포함한 마산만을 특별관리해역으로 지정하였으며(해역: 142.99 km², 육역: 157.66 km²), 2007년에는 해양으로 유입되는 오염물질을 사전예방적으로 관리하는 제도인 연안오염총량관리제도를 도입하였다. 연안오염총량관리제도는 해역의 목표 수질을 정하고 지자체별로 유입되는 오염물질의 부하량을 관리하는 제도이다.

본 연구에서는 인위적인 오염원들로부터 위협을 받고 있는 마산만 내에서 해양환경 주요 인자들의 분포 특성 및 장기변동 양상을 살펴보고, 2007년 마산만 연안오염총량관리제도 도입 전후의 해양환경 변화 양상을 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사방법

마산만 내에서 해양환경 인자들의 장기적인 변화 양상을 살펴보기 위해 1997~2016년(분기별 조사: 2월, 5월, 8월, 11월)까지 해양

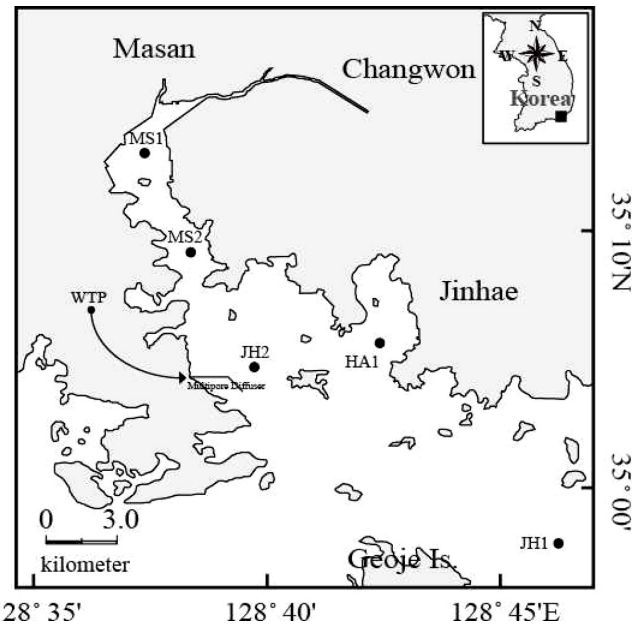


Fig. 1. A map showing the sampling locations in Masan Bay. Abbreviations (MS: Masan Bay, JH: Jinhae Bay, HA: Haengam Bay).

수산부 해양환경측정망 운영 사업을 통해서 생산된 자료들을 활용하였다(www.meis.go.kr). 자료는 연안오염총량관리제도 시행 및 평가를 위해 사용되는 마산만 특별관리해역 내 총 5개(마산만 정점 1, 2, 진해만 정점 1, 2, 행암만 정점 1) 정점의 조사 결과를 이용하였다(Fig. 1). 또한 공간적으로 수질 변화 양상을 살펴보기 위해서 마산만 전 해역을 인구가 밀집된 지역과 산업단지로부터 유입되는 오염물질의 직접적인 영향을 받는 내측(마산만 정점 1, 2)과 상대적으로 영향이 적은 외측(진해만 정점 1, 2) 그리고 행암만으로 구분하여 수질의 장기변동 양상을 살펴보았다. 연안오염총량관리제도 도입 전후의 마산만 오염 변화를 살펴보기 위해서 총량관리제도 시행전(1997~2006년)과 시행후(2007~2016년)로 자료를 구분하여 살펴보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경 인자의 장기 변동 특성

마산만의 연안오염총량관리제도 이행 평가에 사용되는 5개 정점(마산만 정점 1, 2, 진해만 정점 1, 2, 행암만 정점 1)에 대한 해양환경 장기변동 양상을 파악하기 위해서 20년간 표층수 중 해양환경 인자들의 농도 범위와 평균, 표준편차를 Table 1, 2와 Fig. 2, 3에 정리하였다.

마산만의 표층 수온은 3.81~30.00°C(평균: 16.49±6.79°C) 범위로 8월(평균: 25.31°C)에 가장 높고 2월(평균: 6.65°C)에 가장 낮은 전형적인 계절적 변화 양상을 보였다(Table 1). 겨울(2월)에 비해 여름(8월)에 표층 수온이 약 3.8배 높은 것으로 나타났다. 표층 염분은 2.52~34.30(평균: 31.01±3.29) 범위로 강수량이 증가하는 8월(평균: 27.86)에 가장 낮았고 염분의 변동폭이 가장 크게 나타났으며(표준

Table 1. Maximum, minimum, and average contents of temperature, salinity, pH, DO, COD, chlorophyll *a*, and SPM in surface seawater of Masan Bay during 1997~2016

Sampling		Temperature (°C)	Salinity	pH	DO (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	Chl <i>a</i> (µg L ⁻¹)	SPM (mg L ⁻¹)
Inner part of Masan Bay	Annual aver.	3.81-28.30 (16.32±7.08)	2.52-34.30 (30.15±4.17)	6.12-8.99 (8.17±0.31)	3.76-14.91 (9.09±2.42)	1.07-6.43 (2.99±1.25)	0.17-71.00 (13.24±10.71)	0.60-34.40 (7.64±5.45)
	Feb.	3.81-7.13 (5.79±0.93)	30.94-33.75 (32.56±0.57)	6.12-8.58 (8.11±0.39)	6.64-13.72 (10.85±1.73)	1.07-5.12 (2.44±0.80)	0.17-27.73 (11.17±7.48)	2.30-17.30 (7.68±4.11)
	May	13.00-20.51 (17.45±1.50)	24.27-34.30 (30.82±2.02)	7.48-8.99 (8.29±0.30)	4.66-13.85 (9.48±2.34)	1.28-6.43 (3.53±1.25)	4.04-32.88 (4.08±6.88)	1.20-22.50 (8.10±4.39)
	Aug.	19.40-28.30 (25.21±1.72)	2.52-32.50 (25.96±6.32)	7.53-8.86 (8.29±0.27)	5.49-14.91 (8.86±2.50)	1.65-6.43 (3.81±1.29)	1.11-71.00 (18.92±14.75)	1.80-34.40 (10.13±7.60)
	Nov.	13.44-18.61 (16.84±1.36)	27.31-32.51 (31.24±1.03)	7.72-8.27 (8.00±0.13)	3.76-11.56 (7.18±1.45)	1.10-4.27 (2.18±0.74)	1.57-52.46 (8.81±9.50)	0.60-20.67 (4.67±3.38)
Outer part of Masan Bay	Annual aver.	4.55-28.50 (16.53±6.46)	21.03-33.98 (31.59±2.42)	7.67-8.79 (8.18±0.21)	3.64-15.59 (9.07±1.87)	0.14-6.64 (1.98±1.06)	0.12-44.60 (6.86±6.57)	0.60-27.10 (6.18±4.28)
	Feb.	4.55-11.50 (7.37±1.82)	32.25-33.98 (33.08±0.47)	7.67-8.52 (8.09±0.20)	6.66-13.44 (10.01±1.58)	0.14-3.19 (1.58±0.72)	0.21-21.90 (5.26±5.32)	1.40-16.85 (6.57±3.90)
	May	13.49-20.36 (16.57±1.32)	29.04-33.79 (32.29±1.13)	7.77-8.62 (8.23±0.18)	3.74-13.01 (9.33±1.71)	0.69-6.64 (2.21±1.21)	1.05-20.70 (6.47±4.60)	2.60-17.00 (6.01±3.26)
	Aug.	22.56-28.50 (25.07±1.48)	21.03-32.81 (29.17±3.50)	7.78-8.79 (8.31±0.24)	5.03-15.59 (9.18±2.28)	1.23-6.50 (2.62±1.19)	0.12-44.60 (11.13±9.44)	10.40-27.10 (6.58±5.30)
	Nov.	13.54-20.01 (17.12±1.33)	26.20-33.10 (31.82±1.11)	7.83-8.47 (8.08±0.14)	3.64-9.91 (7.78±0.98)	0.53-3.00 (1.50±0.58)	1.19-13.25 (4.57±3.27)	0.60-22.80 (5.55±4.47)
Haengam Bay	Annual aver.	4.92-30.00 (16.75±6.74)	22.50-34.08 (31.57±2.34)	7.72-8.94 (8.23±0.22)	5.05-15.20 (9.95±2.13)	0.88-6.51 (2.50±0.96)	0.78-50.45 (9.45±7.70)	1.20-26.30 (6.98±4.84)
	Feb.	4.92-11.62 (6.91±1.44)	32.44-34.08 (33.08±0.37)	7.81-8.54 (8.16±0.20)	5.66-13.52 (10.86±1.86)	0.88-3.20 (1.98±0.76)	0.97-22.05 (6.88±5.60)	1.20-24.80 (7.20±5.35)
	May	15.35-20.00 (17.08±1.22)	29.80-33.44 (32.21±1.13)	7.82-8.62 (8.27±0.20)	5.05-14.35 (10.20±2.26)	1.61-5.18 (2.46±0.82)	4.12-15.77 (9.79±3.57)	2.80-18.00 (7.16±3.90)
	Aug.	23.78-30.00 (26.00±1.64)	22.50-32.76 (29.06±3.39)	7.72-8.94 (8.35±0.26)	5.34-15.20 (9.80±2.43)	1.30-6.51 (3.18±1.16)	1.20-26.30 (7.03±5.48)	0.78-50.45 (12.25±12.69)
	Nov.	13.33-19.32 (17.00±1.39)	30.11-33.06 (31.92±0.57)	7.95-8.57 (8.15±0.17)	5.82-12.53 (8.95±1.53)	1.45-3.79 (2.36±0.66)	2.07-19.28 (8.90±5.25)	1.50-24.00 (6.52±4.80)

편차: 5.02), 2006년 8월에 19.88로 가장 낮았다.

표층수 중 수소이온농도(pH)와 용존산소(DO) 농도는 각각 6.12~8.99(평균: 8.19±0.26), 3.64~15.59 mg L⁻¹(평균: 9.26±2.18 mg L⁻¹) 범위였다. 표층수 중 DO 농도는 수온과 상관성($r^2=0.0774$)이 낮은 반면 저층수 중 DO 농도는 수온과 상대적으로 좋은 음의 상관관계를 보였다($r^2=0.6267$). 저층 DO 농도는 수온이 낮은 2월에 평균 10.40 mg L⁻¹로 가장 높고 8월에 5.11 mg L⁻¹로 가장 낮았다(Fig. 4). 해수 중 DO 농도는 주로 수온, 염분, 식물플랑크톤의 광합성과 호흡, 유기물 분해 과정 등에 의해서 영향을 받게 된다(Cole *et al.*, 1992). 마산만 저층수 중 DO 농도는 수온에 의해 주로 영향을 받는 것으로 나타났으며, 표층수의 경우 식물플랑크톤의 광합성 과정에서 공급된 산소에 의해 수온과 DO와의 상관관계가 상대적으로 낮았던 것으로 판단된다.

표층수 중 클로로필 *a* 농도는 0.12~71.00 µg L⁻¹(평균: 9.93±9.10 µg L⁻¹) 범위였고, 대부분 강수량의 증가로 영양염의 공급이 많고 수온이 높은 8월에 상대적으로 높았다. 클로로필 *a* 농도는 마산만 내측에서 가장 높았고, 행암만, 마산만 외측 순으로 높았으며, 마산

만 외측에 비해 내측에서 약 6 µg L⁻¹ 이상 높았다(Table 1).

마산만 내 표층수 중 COD 농도는 조사가 시작된 이후 점차 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2). 계절적 변동은 강수량 증가로 인하여 육상으로부터 해양으로 오염 부하량이 증가하는 8월에(평균: 3.21±1.33 mg L⁻¹) 가장 높았고 11월에(평균: 1.94±0.76 mg L⁻¹) 상대적으로 낮았다. 특이하게 2005년 이후 8월에 COD 농도가 상당히 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2). 여름에 상승한 COD 농도의 원인을 유추하기 위하여 마산만 내측 정점과 외측 정점을 구분하여 표층수 중 COD 농도의 장기변동 양상을 살펴보았다. 마산만 외측 정점은 COD 농도가 2000년대에 들어 점차 감소하는 경향을 보였으며, 2006년부터 2016년까지 8월에 표층 COD 평균 농도는 2.57 mg L⁻¹로 2006년 이전 평균 농도(2.68 mg L⁻¹) 보다 낮았다. 반면 마산만 내측 정점(마산만 정점 1, 2)에서 8월에 표층 COD 농도(4.00 mg L⁻¹)는 2006년 이전에 비해 약 0.42 mg L⁻¹ 증가한 것으로 나타났다. 마산만 내측에서 COD와 클로로필 *a* 농도 사이의 계절별 상관관계수(R)는 5월, 8월, 11월에 0.572~0.633 범위로 나타났다. 마산만 내측에서 COD 농도는 2월(0.065)을 제외하고 만

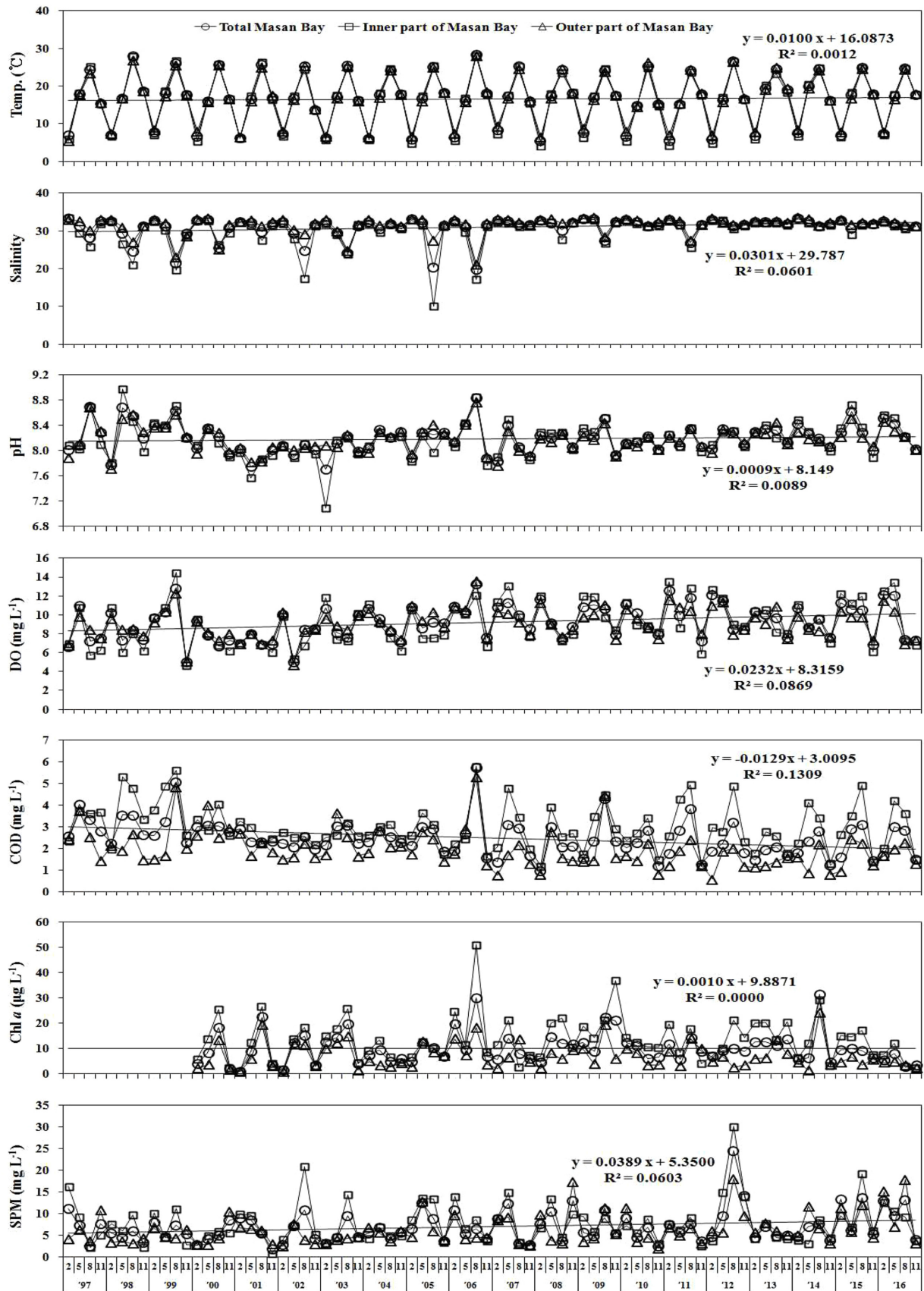


Fig. 2. The long-temporal variations of environmental parameter contents (temperature, salinity, pH, DO, COD, chlorophyll *a*, and SPM) in surface seawater of Masan Bay during the period of 1997~2016. The trend line is for the data of total Masan Bay.

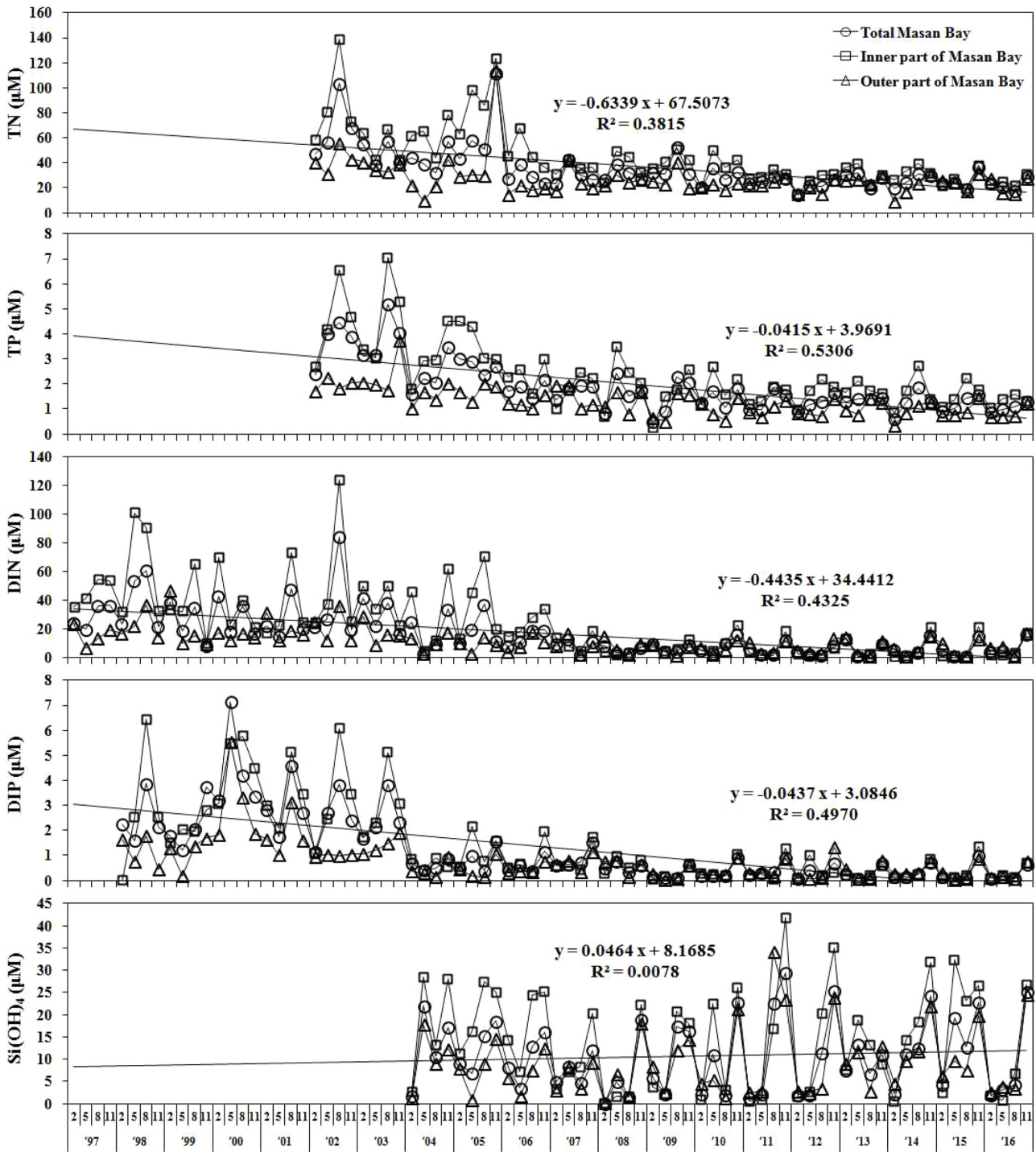


Fig. 3. The long-temporal variations of environmental parameter contents (TN, TP, DIN, DIP, and Si(OH)₄) in surface seawater of Masan Bay during the period of 1997~2016. The trend line is for the data of total Masan Bay.

내의 자생 유기물에 의해 상대적으로 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. Eom *et al.*[2012]에 의해 조사된 결과에 의하면 마산만 내 COD 농도 분포는 외부 유입에 의한 요인보다는 자생 유기물에 의한 영향이 큰 것으로 보고하였다. Kim *et al.*[2012]은 1995년부터 2005년까지 마산만 내 수질 변동 양상을 살펴본 결과, 2001년 이

후 용존무기질소(DIN)와 COD 농도가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 하수처리 용량 증설 등과 관련이 있는 것으로 보고하였다. Kwon *et al.*[2014]은 진해만에서 수질 장기 변동 특성을 살펴보고 있으며, 마산만 외측에 비해 내측의 유기물 증가는 육상 오염원에 인접해 있고 원활하지 않은 해수의 유동 영향인 것으로 보고하였다.

2005년 이후의 8월에 COD 농도가 상대적으로 높게 나타난 것은 육상으로부터 유기물질의 공급이 증가하였거나 마산만 내측 체류시간의 증가가 원인일 가능성이 있다(Kwon *et al.*[2014]). Chang *et al.*[2012]의 조사결과에서 마산만 인근 주요하천으로부터 만내로 유입되는 오염 부하량은 연안오염총량관리제도 도입 이후 점차 감소하고 있는 것으로 보고하였다. Park *et al.*[2009]에 의하면 마산만 외측에서는 입자의 체류시간은 약 10일 전후였으며, 마산만 내측으로 갈수록 체류시간이 급격하게 증가하는 양상을 보이고, 마산만 내측 삼호천 주변 해역에서 체류시간은 약 75일 이상인 것으로 보고하였다. 따라서 마산만 내측에서 2005년 이후 8월에 COD 농도의 증가는 다양한 요인(매립, 구조물 건설 등)에 의한 체류시간의 변화와 연관이 있을 것으로 생각된다.

3.2 영양염의 장기 변동 특성

마산만 내 총질소(TN)와 총인(TP) 농도의 장기적인 변동 양상은 Fig. 3에 나타내었다. 조사가 시작된 이후 TN과 TP 농도는 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. TN 농도는 2.93~416.80 μM (평균: 41.13 \pm 46.51 μM) 범위였으며, 조사가 시작된 이후 지속적으로 감

소하는 경향을 보였다. 1997~2016년까지 표층수 중 TN의 총 평균 농도는 마산만 외측에 비해 내측에서 약 1.7배 높았다(Table 2). TP 농도는 0.15~19.06 μM (평균: 2.03 \pm 1.80 μM) 범위로 겨울(2월)에 낮고 여름(8월)에 상대적으로 높았다(Table 2). 마산만 내측과 외측을 비교했을 때 8월에 평균 농도가 각각 2.93 μM , 1.29 μM 로 내측에서 약 2배 이상 높았다.

지난 20년간 표층수 중의 용존무기질소(DIN = $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) 농도는 0.09~133.34 μM (평균: 16.48 \pm 21.11 μM) 범위였으며, 계절별로 강수량이 많은 8월에 평균 농도가 가장 높았다(평균: 21.59 \pm 31.14 μM)(Table 2). 영양염의 공간적 분포를 보면 대체로 마산만 외측에 비해 내측에서 약 2배 높았다(Table 2). 표층수 중 용존무기인(DIP) 농도는 0.00~13.70 μM (평균: 1.21 \pm 1.68 μM) 범위였고, 계절별 평균 농도는 11월에 가장 높았다(평균: 1.51 \pm 1.40 μM)(Table 2).

DIN과 DIP 농도의 장기 변동 양상을 살펴보면 1997년부터 2005년까지는 DIN과 DIP 농도가 8월에 높았고, 그 이후로 8월보다 11월에 상대적으로 높게 나타났다가(Fig. 3). 반면 TN과 TP의 계절별 분포 양상에서는 11월에 농도가 증가하는 양상은 뚜렷하게 나타나

Table 2. Maximum, minimum, and average contents of NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , DIN, PO_4^{3-} , Si(OH)_4 , TN, and TP in surface seawaters of Masan Bay during 1997~2016

	Sampling	NH_4^+ (μM)	NO_2^- (μM)	NO_3^- (μM)	DIN (μM)	PO_4^{3-} (μM)	Si(OH)_4 (μM)	TN (μM)	TP (μM)
Inner part of Masan Bay	Annual aver.	0.04-96.14 (11.62 \pm 15.54)	0.00-17.99 (1.24 \pm 2.24)	0.00-90.14 (10.41 \pm 16.59)	0.10-133.34 (23.27 \pm 27.65)	0.03-8.06 (1.41 \pm 1.70)	0.08-44.91 (14.50 \pm 11.85)	5.93-416.80 (52.55 \pm 53.49)	0.15-7.62 (2.43 \pm 1.63)
	Feb.	0.04-63.11 (7.83 \pm 11.78)	0.00-2.58 (0.62 \pm 0.54)	0.01-90.14 (10.79 \pm 18.50)	0.24-92.21 (19.25 \pm 21.25)	0.03-3.34 (0.79 \pm 0.95)	0.08-14.84 (4.24 \pm 4.58)	5.93-416.80 (58.78 \pm 91.55)	0.15-7.05 (2.04 \pm 1.81)
	May	0.26-62.27 (9.89 \pm 14.40)	0.00-2.71 (0.58 \pm 0.67)	0.01-71.00 (8.52 \pm 14.16)	0.27-123.50 (18.99 \pm 26.52)	0.05-7.26 (1.25 \pm 1.55)	0.61-38.94 (11.94 \pm 11.99)	18.27-153.04 (52.61 \pm 33.66)	0.77-7.62 (2.46 \pm 1.48)
	Aug.	0.07-96.14 (15.44 \pm 21.28)	0.01-17.61 (1.90 \pm 3.27)	0.00-80.64 (14.70 \pm 23.24)	0.10-133.34 (32.04 \pm 40.17)	0.03-8.06 (1.83 \pm 2.48)	0.54-35.50 (15.16 \pm 9.39)	12.19-149.80 (51.41 \pm 35.80)	0.92-7.31 (2.93 \pm 1.78)
	Nov.	0.27-57.71 (13.32 \pm 12.26)	0.09-17.99 (1.85 \pm 2.72)	2.25-16.69 (7.61 \pm 2.98)	4.30-77.62 (22.78 \pm 15.32)	0.24-5.18 (1.75 \pm 1.24)	7.46-44.91 (25.85 \pm 8.60)	25.34-141.45 (47.06 \pm 26.64)	1.19-6.19 (2.54 \pm 1.36)
Outer part of Masan Bay	Annual aver.	0.01-49.79 (5.11 \pm 6.84)	0.00-3.82 (0.61 \pm 0.62)	0.02-48.38 (5.55 \pm 6.20)	0.23-70.05 (11.27 \pm 10.62)	0.00-6.91 (0.79 \pm 0.97)	0.02-38.91 (9.20 \pm 8.04)	3.71-392.27 (31.27 \pm 39.39)	0.29-6.46 (1.38 \pm 0.88)
	Feb.	0.57-49.79 (7.86 \pm 9.94)	0.05-1.29 (0.55 \pm 0.31)	0.36-24.88 (6.70 \pm 5.95)	2.49-57.21 (15.11 \pm 11.82)	0.01-3.26 (0.68 \pm 0.68)	0.14-12.89 (4.55 \pm 3.78)	6.95-392.27 (40.25 \pm 71.09)	0.30-6.46 (1.40 \pm 1.17)
	May	0.01-15.04 (2.78 \pm 3.55)	0.00-1.59 (0.31 \pm 0.33)	0.02-18.80 (3.73 \pm 4.70)	0.30-29.43 (6.82 \pm 6.97)	0.02-6.91 (0.70 \pm 1.27)	0.02-19.71 (6.38 \pm 5.27)	3.71-61.16 (25.57 \pm 13.74)	0.29-3.08 (1.20 \pm 0.74)
	Aug.	0.09-28.00 (4.99 \pm 6.64)	0.00-3.82 (0.48 \pm 0.69)	0.04-48.38 (5.20 \pm 9.17)	0.23-70.05 (10.67 \pm 13.99)	0.00-4.72 (0.75 \pm 1.16)	0.39-38.91 (8.27 \pm 9.13)	8.40-99.14 (25.72 \pm 17.60)	0.50-3.68 (1.29 \pm 0.75)
	Nov.	0.14-15.57 (4.81 \pm 4.70)	0.14-3.52 (1.07 \pm 0.73)	1.80-13.31 (6.59 \pm 3.02)	3.31-28.36 (12.47 \pm 6.23)	0.34-2.85 (1.05 \pm 0.56)	5.06-29.17 (17.59 \pm 6.02)	12.93-136.71 (33.68 \pm 24.16)	0.35-5.00 (1.63 \pm 0.78)
Haengam Bay	Annual aver.	0.02-42.94 (6.18 \pm 8.99)	0.00-3.71 (0.57 \pm 0.70)	0.01-54.06 (6.58 \pm 10.92)	0.09-100.71 (13.33 \pm 18.04)	0.01-13.70 (1.67 \pm 2.45)	0.02-23.01 (6.78 \pm 6.71)	2.93-296.42 (38.04 \pm 39.77)	0.29-19.06 (2.43 \pm 2.81)
	Feb.	0.43-21.21 (5.79 \pm 5.65)	0.02-1.00 (0.42 \pm 0.30)	0.12-36.93 (6.46 \pm 9.34)	1.22-50.02 (12.67 \pm 13.36)	0.02-6.23 (1.26 \pm 1.84)	0.06-11.87 (2.80 \pm 3.50)	3.76-296.42 (44.22 \pm 66.83)	0.40-7.97 (1.81 \pm 1.96)
	May	0.02-17.72 (4.25 \pm 5.65)	0.00-1.28 (0.30 \pm 0.37)	0.01-19.31 (3.56 \pm 5.75)	0.17-37.13 (8.11 \pm 10.48)	0.01-13.70 (1.76 \pm 3.33)	0.02-17.64 (6.25 \pm 5.63)	2.93 \pm 65.27 (31.29 \pm 16.02)	0.29-7.13 (2.11 \pm 2.01)
	Aug.	0.05-42.94 (10.33 \pm 14.28)	0.00-3.71 (0.71 \pm 1.03)	0.04-54.06 (11.46 \pm 18.01)	0.09-100.71 (22.50 \pm 29.30)	0.07-6.39 (1.72 \pm 2.13)	0.42-21.80 (4.96 \pm 6.24)	10.88-127.52 (40.43 \pm 33.18)	0.62-19.06 (3.59 \pm 4.59)
	Nov.	0.21-29.07 (4.35 \pm 6.54)	0.07-2.29 (0.83 \pm 0.76)	0.43-12.99 (4.85 \pm 3.70)	0.98-36.93 (10.03 \pm 8.82)	0.10-9.68 (1.93 \pm 2.36)	0.75-23.01 (13.08 \pm 6.60)	6.61-106.53 (36.08 \pm 25.35)	1.13-6.02 (2.19 \pm 1.34)

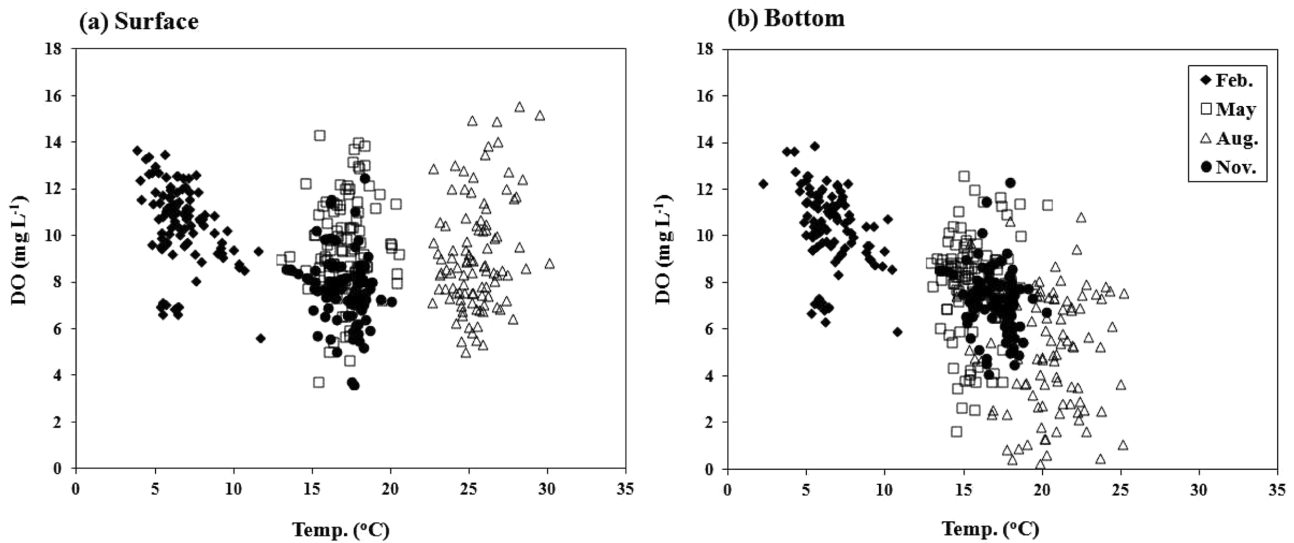


Fig. 4. Plots of temperature vs. DO in (a) surface and (b) bottom seawaters of Masan Bay.

지 않았다(Fig. 3). 1997~2005년까지 8월에 측정된 표층수와 저층수 중 DIN의 평균 농도는 각각 $42.69 \mu\text{M}$, $33.28 \mu\text{M}$ 로 표층수에서 높은 농도를 보여 수괴가 안정화되어 있는 8월에 육상으로부터 마산만 내로 영양염의 공급이 많았던 것으로 판단된다. 반면 2006~2016년 8월에 측정된 표층수와 저층수 중 DIN의 평균 농도는 각각 $4.32 \mu\text{M}$, $9.89 \mu\text{M}$ 로 저층에서 상대적으로 높게 나타났으며, 2006년 이전 농도에 비해 약 3배 이상 낮았다. 2006년~2016년 11월에 표층수와 저층수에서 DIN의 평균 농도는 각각 $12.44 \mu\text{M}$, $11.26 \mu\text{M}$ 로 큰 차이를 보이지 않았다. 하수종말처리장 시설 증대 및 연안오염총량관리제도 시행 등으로 인하여 8월에 육상으로부터 마산만으로 유입되는 DIN과 DIP의 공급은 감소한 것으로 판단된다. 2005년 이후 다른 계절에 비해 11월에 DIN과 DIP 농도가 상대적으로 높게 나타난 것은 육상으로부터의 영양염의 공급은 감소하고 11월에 수괴의 안정도가 감소하면서 영양염이 풍부한 저층수와 표층수의 원활한 혼합에 의한 공급으로 판단된다(Fig. 4).

마산만 전 해역에서 표층수 중 DIN/DIP 비는 2월, 5월, 8월, 11월에 각각 39.2, 20.4, 28.5, 15.1로 2월에 가장 높고 11월에 가장 낮았다. 식물플랑크톤의 성장에 필요한 DIN/DIP 비는 약 16(redfield ratio)으로 알려져 있어 2, 5, 8월에는 DIP가, 11월에는 DIN이 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용한 것으로 판단된다(Fig. 5). DIN/DIP 비의 장기적인 변화 양상을 살펴보면 8월에는 2006년 이후 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 11월에는 서서히 증가하는 양상을 보여주고 있다. 앞에서 살펴보았듯이 계절별로 육상으로부터 공급되는 영양염의 증감과 공급 기원의 변화로 인한 마산만 내 영양염의 상대적인 비가 달라지고 있는 것으로 판단된다. 지난 20년 동안 마산만 정점별 표층수의 DIN/DIP 비를 살펴보면 2월에 총 조사정점 중 약 70%의 정점에서 16 보다 높았으며, 5월, 8월, 11월에는 각각 62%, 55%, 73%에서 16 보다 낮았다. 마산만 내측과 외측 정점에서 계절별 DIN/DIP 비는 각각 평균 15.36~33.45, 13.2~40.67

범위였으며, 마산만 내측에서는 5월, 외측에서는 11월에 redfield ratio(DIN/DIP=16:1) 이하로 가장 낮았다. 마산만 내측 5월과 외측에서 11월에 조사된 DIN/DIP 비의 변동계수(CV)는 각각 90%, 56%로 가장 낮았으며, 이외의 계절에는 129~150%로 연도별로 상당한 차이를 보였다.

표층수 중 규산염(DSi: Dissolved inorganic silicate)의 계절별 농도는 $0.02\sim44.91 \mu\text{M}$ (평균: $10.82\pm 10.00 \mu\text{M}$) 범위였고, 11월에 가장 높았고(평균: $19.99\pm 8.79 \mu\text{M}$), 2월에 가장 낮았다(평균: $4.07\pm 4.05 \mu\text{M}$). DSi/DIN 비는 2월과 11월에 2.5 이하였고, 5월과 8월에는 7~8로 상대적으로 높게 나타났다.

마산만 내에서 식물플랑크톤의 종조성은 해역별로 시간에 따라 다르게 나타나는 것으로 보고되고 있으며(Kim and Shin[1997]; Cho *et al.*[1998]; Kwak *et al.*[2001]; Lee *et al.*[2009]), 마산만 내 계절별, 정점별로 다른 DIN/DIP, DSi/DIN 비는 마산만 내 식물플랑크톤의 군집조성에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다(Kudo[2003]; Lee and Kim[2007]). 또한 계절별 DIN/DIP 비의 장기적인 변화가 마산만 내 식물플랑크톤의 군집조성에 미치는 영향에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3.3 연안오염총량관리제도 시행전·후의 해양환경 변화

2007년부터 마산만 연안오염총량관리제도의 도입에 따른 수질 개선 효과를 살펴보기 위해서 총량관리제도 시행전(1997~2006년)과 시행후(2007~2016년)의 마산만 내 주요 오염인자들의 변화 양상을 살펴보았다. 또한 마산만의 내측(마산만 정점 1, 2)과 외측(진해만 정점 1, 2)의 정점들을 분리하여 변화 양상을 살펴보았다(Fig. 6, Table 1, 2).

마산만 연안오염총량관리제도 시행전·후의 마산만 전 해역 표층수 중 COD, TN, TP, DIN, DIP 평균 농도는 각각 0.56 mg L^{-1} , $33.24 \mu\text{M}$, $1.65 \mu\text{M}$, $20.49 \mu\text{M}$, $1.73 \mu\text{M}$ 감소하였으며, 비율로는

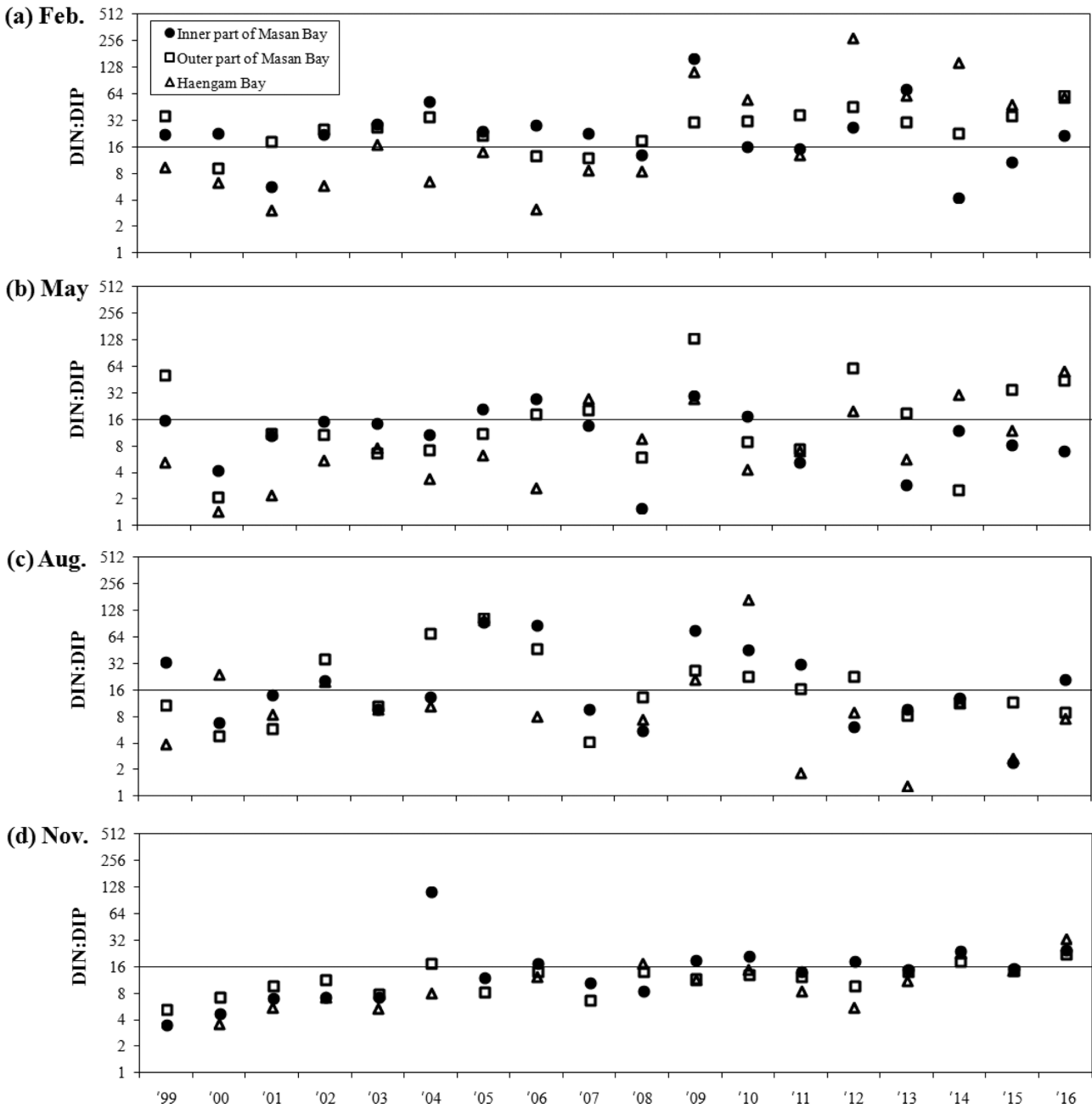


Fig. 5. The seasonal variation of DIN:DIP molar ratio in surface seawater of Masan Bay. The y-axis is the log value.

각각 20%, 55%, 55%, 77%, 81% 감소하였다. 마산만 내측에서 총량관리제도 시행전·후의 COD, TN, TP, DIN, DIP 평균 농도 감소 비율은 각각 8%, 53%, 53%, 84%, 83%였고, 외측에서는 30%, 43%, 40%, 58%, 67%였다. 마산만 내측에서는 질소와 인 계열 농도가 50% 이상 감소하였고, COD 농도는 내측에 비해 외측에서 감소 비율이 높았으며, 질소와 인 계열 농도 감소 비율은 오히려 낮았다. 행암만에서는 COD, TN, TP, DIN, DIP 평균 농도 감소 비율은 각각 29%, 29%, 54%, 78%, 88% 였다(Fig. 6).

Chang *et al.*(2012)은 2005년부터 2010년까지 마산만 내에서 조

사된 결과를 토대로 연안오염총량관리제도가 시행된 이후 마산만 내의 COD, TN, TP 농도는 상당히 감소한 것으로 보고하였으며, 본 연구결과에서도 마산만 연안오염총량관리제도 도입 이후 마산만 특별관리해역에서 수질을 평가한 결과, 전반적으로 개선된 것으로 나타났다. 그러나 해양환경 인자들의 계절별, 공간적 분포현황을 살펴보면, 마산만 내측 해역에서는 8월에 COD 농도가 오히려 증가한 것으로 나타났다. 따라서 향후 마산만의 수질 개선을 위해서는 해역별 주요 오염원에 대한 집중적인 모니터링 및 해역별 수질개선편안 마련이 필요할 것으로 판단된다.

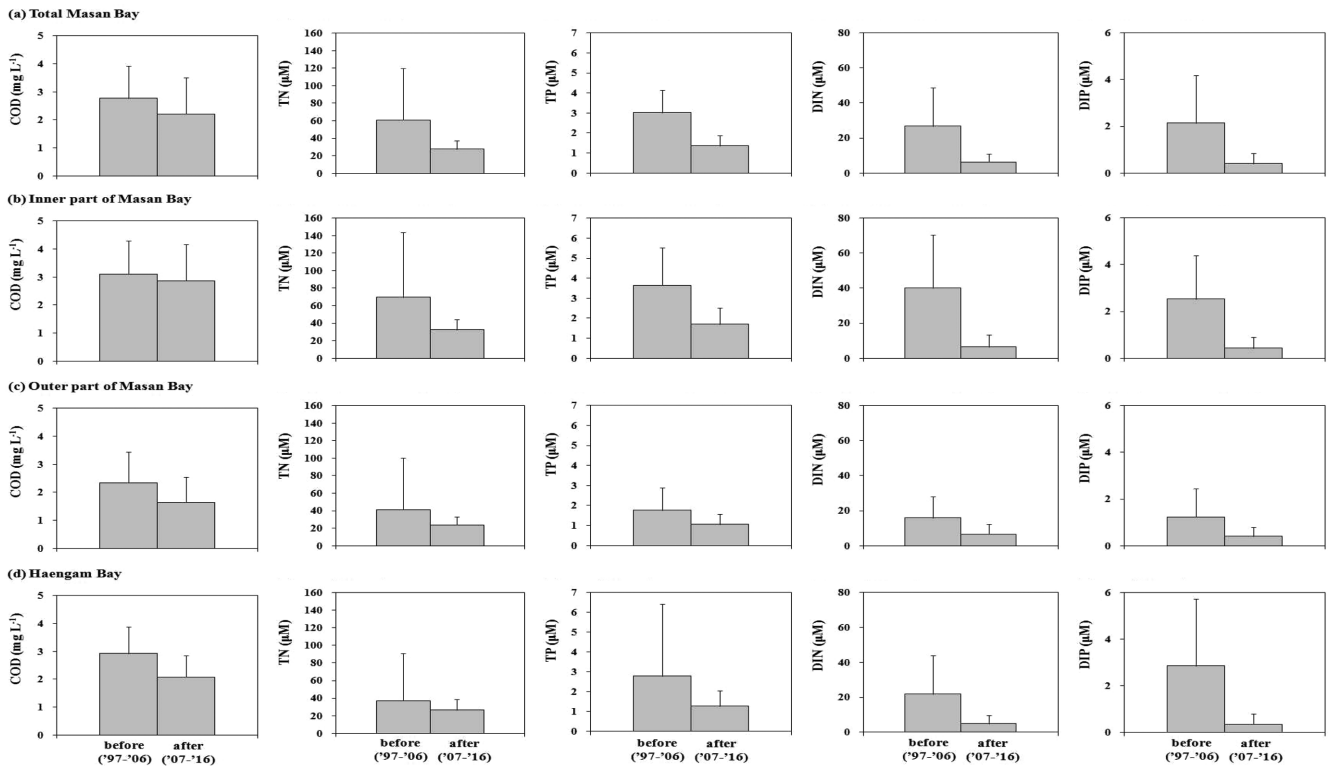


Fig. 6. The changes of COD, TN, TP, DIN, and DIP concentrations in surface seawater before and after the introduction of the Total Pollution Load Management System (TPLMS).

4. 결 론

마산만에서 오염지표로 주로 사용되는 COD, TN, TP 농도는 하수처리장 시설 용량 증대 및 연안오염총량관리제도 시행 등으로 인하여 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 마산만 연안오염총량관리제도 시행 후의 COD, TN, TP, DIN, DIP 평균 농도는 시행 전에 비해 각각 20%, 55%, 55%, 77%, 81%로 감소한 것으로 나타났다. 반면 마산만 내측과 외측의 자료를 서로 비교했을 때 마산만 내측에서는 2005년 이후 8월에 COD 농도는 오히려 증가한 것으로 나타났다. 마산만 특별관리해역 이행 평가를 위한 5개 점정에 대한 오염물질의 조사 결과는 수질이 개선되는 것으로 나타나고 있으나, 마산만 내측에서는 여름에 오히려 수질이 악화되는 것으로 나타났다. 육상으로부터 유입되는 유기물질의 증가보다는 마산만 내측의 체류 시간 증가 등에 의한 것으로 판단되나 지속적인 관찰 및 원인 규명이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 마산만 수질 개선을 위해서는 마산만 외측해역 보다는 내측해역에 대한 집중적인 관리뿐만 아니라 해역의 특성을 고려한 오염 요인별 관리가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 해양환경측정망 운영 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 현장조사 및 분석에 도움을 주신 해양수질팀원들께 감사드립니다.

References

- [1] Chang, W.K., Ryu, J., Yi, Y., Lee, W.C., Lee, C.W., Kang, D., Lee, C.H., Hong, S., Nam, J. and Khim, J.S., 2012, Improved water quality in response to pollution control measures at Masan Bay, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 64(2), 427-435.
- [2] Cho, H.Y. and Chae, J.W., 1998, Analysis on the characteristics of the pollutant load in Chinhae-Masan Bay, *Kor. Soc. Coast. Ocean Eng.*, 10(3), 132-140.
- [3] 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, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 3(4), 193-202.
- [4] Cole, J.J., Caraco, N.F., Peierls, B., 1992, Can phytoplankton maintain a positive carbon balance in a turbid, freshwater tidal estuary? *Limnol. and Oceanogr.*, 37, 1608-1617.
- [5] Eom, K.H., Kim, G.Y., Lee, W.C. and Lee, D.I., 2012, Effective coastal environmental management by conjugation of modeling of bio-purification and total allowable pollutant loads in Masan Bay, *J. Korean Soc. of Mar. Environ. and Saf.*, 15(1), 38-46.
- [6] 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.*, 28(4), 923-929.
- [7] 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 hypoxic season at Jinhae Bay in 2010, *Korean J. Nature Conservation*, 6(2), 115-119.
- [8] Kim, C.H. and Shin, J.B., 1997, Harmful and toxic red tide algal development and toxins production in Korean coastal waters, *Algae*, 12(4), 269-276.
- [9] Kudo, I., 2003, Changes in the uptake and cellular Si:N ratio in diatoms responding to the ambient Si:N ratio and growth phase, *Mar. Biol.*, 143(1), 39-46.
- [10] Kwak, S.K., Choi, M.Y. and Cho, K.J., 2001, Distribution and occurrence frequency of red-tide causing flagellates in the Masan-Jinhae Bay, *Algal*, 16(3), 315-323.
- [11] Kwon, J.N., Lee, J., Kim, Y., Lim, J.H., Choi, T.J., Ye, M.J., Jun, J.W. and Kim, S., 2014, Long-Term Variations of Water Quality in Jinhae Bay, *J. Korean Soc. of Mar. Environ. and Saf.*, 17(4), 324-332.
- [12] Lee, Y.W., Hwang, D.W., Kim, G., Lee, W.C. and Oh, H.T., 2009, Nutrient inputs from submarine groundwater discharge (SGD) in Masan Bay, an embayment surrounded by heavily industrialized cities, Korea, *Sci. Total Environ.*, 407(9), 3181-3188.
- [13] Lee, Y.W. and Kim, G., 2007, Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 71(1-2), 309-317.
- [14] Lee, C.W. and Min, B.Y., 1990, Pollution in Masan Bay, a matter of concern in South Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 21(5), 226-229.
- [15] NFRDI, 2009, Hypoxia in the coast of Korea, 173.
- [16] Park, S.E., Hong, S.J. and Lee, W.C., 2009, Calculating average residence time distribution using a particle tracking model, *J. Ocean Eng. Technol.*, 23(2), 47-52.
- [17] 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. Korean Soc. Mar. Environ. & Saf.*, 10(2), 69-79.
- [18] Yim, U.H., Hong, S.H., Shim, W.J., Oh, J.R. and Chang, M., 2005, Spatio-temporal distribution and characteristics of PAHs in sediments from Masan Bay, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 50(3), 319-326.
- [19] Yoo, K.I., 1991, Population dynamics of dinoflagellate community in Masan Bay with a note on the impact of environmental parameters. *Mar. Pollut. Bull.*, 23, 185-188.

Received 13 April 2018

Revised 9 May 2018

Accepted 15 May 2018