

마산만 표층수에서 물리-화학적 수질요인과 엽록소-*a* 농도 사이의 관계: 격일 관측 자료

정승원 · 임동일* · 신현호 · 정도현 · 노연호

한국해양연구원 남해연구소

Relationship between Physico-Chemical Factors and Chlorophyll-*a* Concentration in Surface Water of Masan Bay: Bi-Daily Monitoring Data

Seung Won Jung, Dhongil Lim*, Hyeon Ho Shin, Do Hyun Jeong and Youn Ho Roh

South Sea Research Institute, KORDI, Geoje 656-830, Korea

Abstract - In order to investigate water quality factors controlling chlorophyll-*a* concentrations, the bi-daily monitoring was conducted from February to November 2010 in 4 stations of Masan Bay. Seasonal variability in physico-chemical factors was mainly controlled by freshwater loading as a result of precipitation: chemical oxygen demand, suspended solids and nutrient concentrations rapidly increase during the heavy rainy season, whereas they decrease in the dry season. From late winter to mid spring, phosphorus and silica sources relative to Redfield ratio were probably functioned as limiting factor for phytoplankton flourishing in surface waters, but nitrogen concentration during mid-spring to autumn might be responsible for the increase of phytoplankton biomass. The multiple regression analysis revealed that variations in chlorophyll-*a* concentration may be strongly correlated with changes of water temperature, chemical oxygen demand, dissolved inorganic phosphorus in spring, and salinity, chemical oxygen demand and precipitation in summer. Consequently, in the Masan Bay, a heavy rainfall event is an important factor to determine changes of biotic and abiotic factors, and in addition the dynamics of chlorophyll-*a* concentration are strongly affected by changes of hydrological factors, especially water temperature, precipitation and nutrients.

Key words : water quality compositions, chlorophyll-*a*, bi-daily monitoring, Masan Bay

서 론

우리나라 남해의 대표적 반폐쇄성 지형 특성을 갖는 마산만은 임해 공업단지과 도시로부터 산업폐수와 생활하수 등 다량의 오염물질이 유입되고 있다. 더욱이 반폐

쇄적인 지형 특성으로 인하여 내해수와 외해수와의 해수 교환이 제한되어 오염물질의 확산과 희석이 느려 오염 현상이 더욱 가속화 되고 있다. 이러한 측면에서 마산만은 심각한 부영양화 및 적조 그리고 패독(shell poisoning)의 발생 빈도가 매우 높은 해역으로 평가되고 있다(조와 채 1997). 특히 여름철 해저 퇴적물내에 많은 양의 유기물 축적과 분해로 인하여 암모니아의 대량 발생과 용존산소의 급격한 소비로 나타나는 저산소 현상

* Corresponding author: Dhongil Lim, Tel. 055-639-8580, Fax. 055-639-8509, E-mail. oceanim@kordi.re.kr

(hypoxia/anoxia) 등은 저서생태계에 악영향을 미칠 수 있어, 시급히 해결해야 할 환경 문제로 제시되고 있다(임 등 2007).

최근에 마산만은 국가 관리 해역으로 지정되어 오염 물질 저감과 수질환경 개선을 위한 물리, 화학, 생물학적으로 많은 연구가 수행되어 왔으며, 수질오염에 따른 생태계 교란과 변화에 대한 연구가 집중적으로 수행되어져 왔다(e.g. 최 등 2000; 광 등 2001; 임 등 2007). 그러나 지금까지 대부분의 연구가 계절적 조사 또는 월별 조사로 제한되어 있어 매일 변화하는 수질환경과 생태계(특히 기초생산력) 사이의 관계를 정확히 파악하기에는 어려움이 있다. 특히 마산만에서 해수의 물리-화학적 성분들은 하천의 담수량, 인근 도시로부터의 인위적 부하량, 그리고 퇴적층으로부터의 재공급 등에 의해 시·공간적으로 매우 급격한 단기 변동이 예측되고 있다. 일반적으로 수질성분들 사이, 더 나아가 수질성분과 부유생태계(일차생산력) 사이에서의 반응은 시간적 지연(time lag) 현상이 존재한다. 그래서 수질성분과 부유생태계 사이의 반응시간 등을 고려한 적당한 시간 간격의 연속 관측이 아닌, 대부분 계절별로 이루어지는 기존연구들을 고려할 때, 마산만의 수질환경과 생물들 사이의 상호반응관계를 정확히 파악·이해하는 데에는 자료의 한계성이 대두된다(임 등 2011).

한편 부유생태계에서 수질환경과 가장 밀접한 반응을 갖는 식물플랑크톤은 1차 생산자로서 계절 및 해역 등 각기 다른 환경에 의해 식물플랑크톤 군집구조의 차이를 보이며, 세포 크기에 따라 다른 먹이연쇄구조를 나타낸다(e.g. Furuya and Marumo 1983). 또한 식물플랑크톤은 환경 변화에 매우 민감하게 반응하기 때문에 더욱 중요한 연구 대상으로 다루어지고 있다(e.g. Goffart *et al.* 1995). 식물플랑크톤 군집의 변동의 표현은 개체수(abundance), 생체량(bio-volume) 및 엽록소-*a* (chlorophyll-*a*) 농도를 사용하고 있으며 각각의 표현이 장단점을 가지고 있지만, 일반적으로 식물플랑크톤 군집의 변동은 개체수와 chlorophyll-*a* 농도의 변동에 따라 주로 해석하고 있다(Sun and Liu 2003). 마산만에서 식물플랑크톤에 관한 연구는 주로 종조성, 군집동태 및 적조에 대한 연구가 집중되어 왔다(e.g. 조 1978; 이와 한 2007). 그러나 이러한 연구들 또한 대부분 계절적 또는 일부 월별 조사에 의존하고 있어 마산만 해역에서 어떤 환경요인들이 식물플랑크톤에 영향을 미치는가를 파악하기는 어렵다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 마산만에서 격일(bi-daily)과 주 간격(weekly)에 따라 변화하는 수질의 변동 양상과 일차 부유생태계의 반응을 대표하는 chlorophyll-*a* 농도를 조절하는 환경요인을 파악하고자 한다.

재료 및 방법

마산만의 내만과 외만을 대표할 수 있는 4개 정점에서 격일(bi-daily)과 주 간격(weekly)으로 수온, 염분 등의 현장관측과 함께 영양염, 용존산소, chlorophyll-*a*를 분석하기 위한 표층수를 채수하였다(Fig. 1). 현장조사와 시료 채취는 2010년 2월부터 8월까지 격일 간격으로, 이후 11월까지 주 간격으로 이루어졌으며, 항상 수온이 가장 높은 시간(13:00~15:00)에 이루어졌다.

수온과 염분은 2대의 CTD (Idronaut Ocean Seven 304)를 이용하여 측정하였으며, 수소이온농도(pH) 또한 현장에서 동일한 모델의 2개의 측정장비(Mettler Toledo SevenGo Pro)를 동시에 이용하여 측정하였다. 투명도는 지름 30 cm 백색 원판(secchi disk)을 수직으로 하강시켜 원판이 보이지 않는 수심까지 내려 보낸 다음 천천히 끌어 올리면서 다시 보이기 시작한 수심을 0.5 m 단위로 측정하였다. 해수의 용존산소(DO), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS)함량, 영양염 농도는 다음과 같이 해양환경 공정시험법(국토해양부 2010)에 준하여 분석하였다. 즉, DO는 잉클러-아지드화나트륨 적정법, COD는 과망간산 칼륨을 환원제인 티오황산나트륨으로 역적정하는 방법을 이용하여 분석하였고 SS는 현장에서 2 L 이상의 해수를 채집 한 후, 실험실에서 GF/F 여과지를 이용하여 측정하였다. 영양염류[용존무기인(DIP, dissolved inorganic phosphorus), 규산염(silicate), 용존무기질소(DIN, dissolved inorganic nitrogen; 질산염+아질산염+암모니아의 합)]농도를 분석하기 위해 채수된 해수 시료를 GF/F 여과지로 여과한 후, 여과된 해수 200 mL를 채취하여 scintillation vial에 넣어 냉동 보관하였으며, 암모니아를 측정하기 위

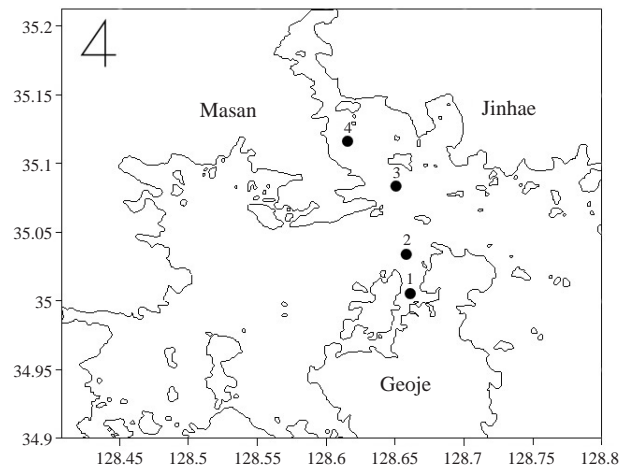


Fig. 1. Sampling sites in Masan Bay.

한 시료는 여과한 해수 50mL에 8N 황산 100 μ L를 넣어 냉동 보관하였다. 이들 영양염류의 측정은 자동해수 영양염류 분석기(Quattro, Bran Luebbe co.)를 이용해 측정하였다. 모든 시료에 대하여 중복분석과 표준해수 시료(Wako CSK standard solution) 분석을 통하여 분석 자료의 신뢰도를 높였다. chlorophyll-*a* 농도의 측정은 시수 1 L를 47 mm 직경의 0.45 μ m polycarbonate membrane에 여과 후, 여과된 물질과 함께 membrane을 90% 아세톤(acetone)에 넣어 암냉소에서 24시간 이상 보관하여 chlorophyll-*a*를 추출하였다. 추출된 chlorophyll-*a*는 형광광도계(Turner 10 AU)에서 흡광도를 측정하여 농도로 계산하였다.

마산 지역의 강수량 및 기온은 기상청(www.kma.go.kr)자료를 이용하였다. 각 분석항목의 정점 간 차이를 알아보기 위해서 one-way ANOVA 분석을 하였고, 환경요인과 chlorophyll-*a*의 상관관계를 파악하기 위해 Pearson 상관분석(correlation analysis)을 수행하였다. 그리고 chlorophyll-*a* 농도에 영향을 미치는 환경요인은 단계적 다중회귀분석(stepwise multiple regression analysis)을 하였다. 일련의 분석은 SPSS(ver. 10.0) 통계 패키지를 이용하였다.

결과 및 토의

1. 수질환경요인들의 정점 및 시간적 변동

마산만에서 관측·분석된 수질환경 요인과 chlorophyll-

a 농도의 정점별 차이 분석결과(one-way ANOVA)를 Table 1에 나타내었다. 결과에서처럼 수온과 염분, 규산염은 각 정점별로 유사한 변동 폭을 보였고 투명도는 마산만의 내만으로 갈수록(정점 1에서 4) 뚜렷이 감소하였다. 그러나 pH, DO, COD 그리고 DIN과 chlorophyll-*a* 농도는 정점 1에서 내만의 정점 4로 갈수록 뚜렷이 증가하였으며, 각 정점에서의 변동 폭 또한 정점 1과 2와 비교하여 정점 3과 4에서 크게 증가하였다. 이러한 정점별(공간별) 변동은 육상으로부터 마산만 내만(정점 4)으로 오염물질의 직접적 유입과 반폐쇄적 지형효과에 의한 해수 순환의 제한에 의해 나타나는 결과로 해석된다(조와 채 1998; 강 등 2001). 한편 DIP는 다른 영양염의 농도 변화와 다르게 육상과 가까운 정점 1과 4에서 높았고, 정점 2와 3에서는 상대적으로 낮았다.

수온은 겨울에서 여름철로 가면서 증가하고 가을과 겨울철로 가면서 감소하는 온대해역의 전형적인 계절적 변화 양상을 보였다(Fig. 2). 염분 또한 겨울에 가장 높았고, 홍수기인 여름철에 전반적으로 감소하였으며, 8월과 9월에는 각각 한차례씩의 집중강우에 의해 4개 정점에서 모두 20 psu까지 감소하였다. 이와 같이 집중호우에 의해 일시적으로 감소한 염분이 다시 가을과 겨울철 염분 값으로 회복되는 데는 최소 2개월 이상 소요되는 것으로 판단된다(Fig. 2). 따라서 마산만 해역은 겨울철에는 상대적으로 고염분의 빈영양수괴인 외해수에 의해 지배되는 반면 여름철에는 저염의 담수 수괴에 의해 조절되는 것으로 판단된다.

DO의 시간적 변화는 4월 초반의 급격한 증가 및 8월

Table 1. Spatial changes in physico-chemical factors and chlorophyll-*a* concentration. Results were analysed by one-way ANOVA and Scheffe tests. Letters (A, B, and C) indicate significant differences among experimental groups. Data showed the mean \pm standard deviation

Factor	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	F value
Water temperature ($^{\circ}$ C)	16.97 \pm 6.73	17.04 \pm 6.44	17.14 \pm 6.53	17.49 \pm 6.85	NS
Salinity (psu)	31.78 \pm 2.13	31.78 \pm 2.19	32.60 \pm 2.41	31.27 \pm 2.41	NS
Transparency (m)	3.9 \pm 1.1 ^A	3.7 \pm 1.3 ^A	2.8 \pm 0.9 ^B	2.6 \pm 1.0 ^B	30.67***
pH	8.19 \pm 0.10 ^B	8.24 \pm 0.11 ^B	8.28 \pm 0.23 ^A	8.29 \pm 0.25 ^A	12.98***
DO (mg L ⁻¹)	8.58 \pm 1.49 ^B	9.02 \pm 1.38 ^B	9.72 \pm 1.79 ^A	10.06 \pm 1.86 ^A	13.80***
COD (mg L ⁻¹)	1.63 \pm 0.70 ^C	1.72 \pm 0.68 ^C	2.19 \pm 0.92 ^B	2.59 \pm 1.30 ^A	19.21***
SS (mg L ⁻¹)	5.99 \pm 4.74	7.82 \pm 6.78	7.93 \pm 6.18	8.17 \pm 6.38	NS
DIN (μ M)	3.79 \pm 4.21 ^B	3.69 \pm 4.54 ^B	4.97 \pm 6.04 ^{AB}	7.01 \pm 8.37 ^A	4.86**
Nitrate (μ M)	2.22 \pm 3.44	2.17 \pm 3.60	2.57 \pm 4.43	2.71 \pm 4.04	NS
Nitrite (μ M)	0.17 \pm 0.22 ^C	0.18 \pm 0.22 ^C	0.27 \pm 0.34 ^{BC}	0.32 \pm 0.40 ^A	4.85**
Ammonia (μ M)	1.57 \pm 1.65 ^B	1.51 \pm 1.68 ^B	2.39 \pm 3.31 ^{AB}	4.30 \pm 6.56 ^A	5.24**
DIP (μ M)	0.21 \pm 0.23 ^{AB}	0.16 \pm 0.19 ^B	0.19 \pm 0.21 ^B	0.24 \pm 0.26 ^A	3.30*
Silicate (μ M)	9.81 \pm 9.44	7.52 \pm 8.10	8.73 \pm 9.30	10.10 \pm 8.85	NS
DIN : DIP ratio	38.39 \pm 106.53	30.75 \pm 31.37	41.21 \pm 53.23	42.05 \pm 48.03	NS
DIN : DSi ratio	0.97 \pm 1.93 ^B	1.11 \pm 1.67 ^B	3.31 \pm 10.85 ^{AB}	9.15 \pm 32.78 ^A	4.79**
chlorophyll- <i>a</i> (μ g L ⁻¹)	3.37 \pm 2.23 ^C	4.19 \pm 2.39 ^{BC}	7.39 \pm 4.66 ^{BC}	12.72 \pm 14.10 ^A	24.84***

*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$; NS, no significance; DO, dissolved oxygen; COD, chemical oxygen demand; SS, suspended solids; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus

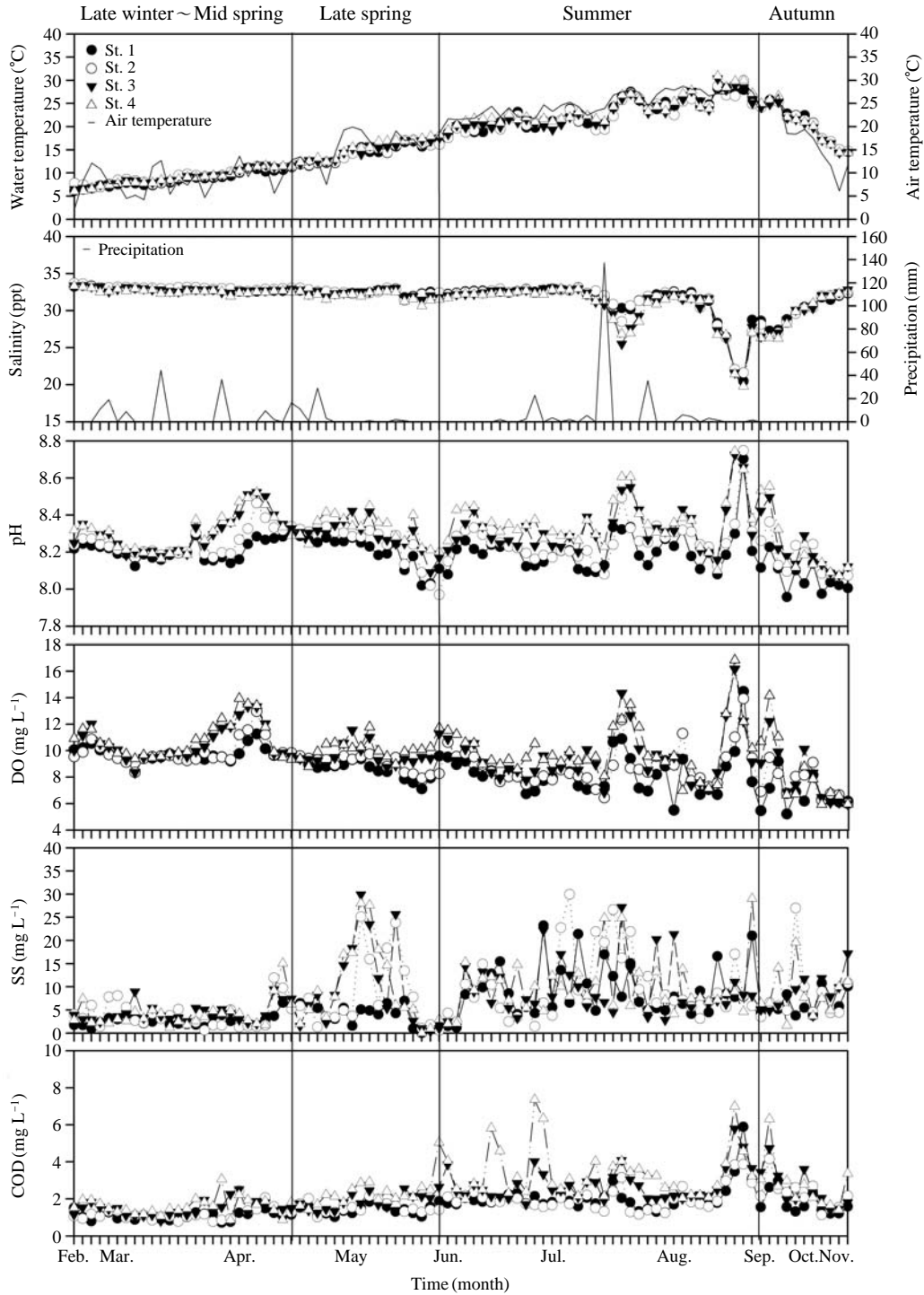


Fig. 2. Seasonal variations in physico-chemical factors in Masan Bay.

의 일시적 증가를 제외하고는 계속적으로 감소하였다 (Fig. 2). 일반적으로 DO의 변화는 크게 생물학적 요인과 물리학적 요인에 영향을 받는다. 생물학적 요인은 주로 광합성을 통하여 산소를 발생하는 식물플랑크톤의 증식과, 반대로 산소를 소비하며 유기물을 분해하는 미

생물 등의 활동이고 물리학적 요인은 수온 및 해황의 영향이다. 본 연구에서 마산만 해역의 DO의 변화는 수온과 밀접한 연관성을 보이며, 수온 상승시 감소하고 수온이 하강시 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 4월의 경우 수온이 증가함에도 불구하고 DO가 증가하였는

데, 이는 식물플랑크톤의 봄철 증가에 따른 영향으로 파악된다. 또한 8월에는 집중강우 및 태풍과 같은 물리적 요인에 의해 DO의 큰 변화를 나타내었다. 따라서 마산만에서 DO의 변화는 일차적으로 수온에 의해 조절되나, 식물플랑크톤 성장 및 해황의 변화와 같은 요인 또한 중요한 인자로 작용하고 있었다.

pH는 4, 7, 8월의 증가를 제외하고 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 2). 일반적으로 해양에서 식물플랑크톤 대발생이 일어날 경우 이산화탄소 농도가 감소함으로써 pH가 증가한다. 마산만 해역의 pH와 chlorophyll-*a* 농도를 비교해 본 결과, 상관관계가 0.20 ($p < 0.001$)로 chlorophyll-*a* 농도의 증가에 따라 pH가 증가하였다. SS는 평균 봄철에 5.83 mg L^{-1} , 여름철에 9.53 mg L^{-1} , 가을철에 7.88 mg L^{-1} 로 여름철에 가장 높은 SS 함량을 보였는데(Fig. 2), 이는 집중강우시 인근 지류하천 및 낙동강 담수 유입에 따른 결과로 판단된다(조와 채 1998). 그리고 SS와 chlorophyll-*a*의 농도는 상관관계가 나타나지 않아 수층 내 유기성 부유물질(e.g. 식물플랑크톤)보다 부유성 고형물이 더 많다고 판단된다. COD는 봄철에 $0.71 \sim 3.06 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 1.50 mg L^{-1}), 여름철에 $1.16 \sim 7.36 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 2.57 mg L^{-1}), 가을철에 $1.14 \sim 6.31 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 2.32 mg L^{-1})로 여름과 가을철에 높았다(Fig. 2). COD와 환경요인들간의 상관관계를 분석해 볼 때 chlorophyll-*a* 농도($r=0.60$, $p < 0.001$)와 밀접한 상관관계를 보였다. 따라서 마산만 해역의 COD의 변화는 해양에서 생산되는 생물기원의 유기물 함량에 영향을 강하게 받고 있음을 알 수 있었다.

2. 영양염 및 chlorophyll-*a*의 시간적 변동

영양염류(DIN, DIP, Silicate) 농도의 시계열 변화를 종합적으로 관찰할 때, 크게 1) 늦겨울~봄 중순, 2) 늦봄, 3) 여름 그리고 4) 가을의 변화가 차이가 있는 4개의 그룹으로 구분된다. DIN 농도는 질산염, 아질산염, 암모니아 농도의 총합으로, 질산염($r=0.77$, $p < 0.0001$)과 암모니아($r=0.79$, $p < 0.0001$)의 변화와 유사하였다. DIN의 계절적 평균 변화는 늦겨울~봄 중순에 $8.62 \mu\text{M}$ ($1.18 \sim 32.61 \mu\text{M}$), 늦봄에 $6.41 \mu\text{M}$ ($0.01 \sim 35.53 \mu\text{M}$), 여름철에 $2.81 \mu\text{M}$ ($0.02 \sim 38.44 \mu\text{M}$), 가을철에 $6.67 \mu\text{M}$ ($0.91 \sim 17.15 \mu\text{M}$)로 집중강우시 DIN 농도가 일시적으로 증가하는 양상을 제외하고는 여름철 농도는 감소하였다(Fig. 3). 연안 해역에서 DIN 농도의 증가는 크게 담수 유입원의 영향을 크게 받는데(Yang and Lee 1983; Kang *et al.* 1999; 손 등 2000), 마산만의 DIN 농도 증가 또한 집중강우시 담수유입의 증가로 나타나는 결과로 판단된다.

DIP 농도의 계절적 변화는 늦겨울~봄 중순에 $0.02 \sim 0.45 \mu\text{M}$ (평균 $0.19 \mu\text{M}$), 늦봄에 $0.01 \sim 0.40 \mu\text{M}$ ($0.19 \mu\text{M}$), 여름철에 $0.01 \sim 0.74 \mu\text{M}$ ($0.15 \mu\text{M}$), 가을철에 $0.02 \sim 1.17 \mu\text{M}$ ($0.58 \mu\text{M}$)로 가을철에 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 3). 손 등(2000)에 따르면 마산만에서 DIP 농도의 증가는 강수량의 증가와 관련이 있다고 보고하였는데, 본 연구결과와도 일치하는 내용이다. 또한 임 등(2011)과 Perry and Eppley (1981)에 따른 수질 등급에서 마산만 해역의 DIP 농도는 가을철을 제외하고 빈영양(oligotrophic)의 농도를 보이고 있었다. 이는 이와 한(2007)이 제시한 2004년도 마산만 해역의 DIP 농도와 유사하였다. 따라서 마산만 해역의 DIP에 농도는 2000년대 이후 큰 변동이 없는 것으로 판단된다.

규산염은 늦겨울~봄 중순에 $0.04 \sim 18.93 \mu\text{M}$ (평균 $3.19 \mu\text{M}$), 늦봄에 $0.01 \sim 35.53 \mu\text{M}$ ($6.41 \mu\text{M}$), 여름에 $0.70 \sim 64.20 \mu\text{M}$ ($12.65 \mu\text{M}$), 가을에 $0.62 \sim 33.57 \mu\text{M}$ ($13.99 \mu\text{M}$)를 보였다(Fig. 3). 규소는 식물플랑크톤 중 큰 비중을 차지하는 규조류의 증감을 조절하는 중요한 인자로, 규조류 성장에 필요한 규산염은 $2 \sim 5 \mu\text{M}$ 이다(Brezeinski *et al.* 1997). 본 연구 결과에서는 저 수온 시(늦겨울~봄 중순) 규산염의 농도가 가장 낮게 나타났는데, 이는 당시 전체 개체수에 90% 이상을 차지하는 규조류들의 높은 성장에 의해 규산염이 빠르게 소모되어 나타나는 결과로 판단된다(미발표자료). 또한 집중강우 후 규산염이 최대 $64.20 \mu\text{M}$ 까지 증가하였는데, 이는 담수에 용존되어 있는 고농도의 규산염이 마산만으로 유입됨을 나타낸다. 더욱이 여름철의 담수와 함께 높은 규산염 공급이 이루어짐에도 불구하고, 고농도가 계속 유지되는 것은 식물플랑크톤 군집 중 non-siliceous taxa나 낮은 규산염 흡수율을 가진 규조류의 성장에 따른 결과라 판단된다(이와 한 2007).

chlorophyll-*a* 농도의 시간적 변화는 늦겨울부터 봄 중순까지 $1.0 \sim 27.9 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $6.4 \mu\text{g L}^{-1}$), 늦봄에 $0.7 \sim 29.0 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $5.3 \mu\text{g L}^{-1}$), 여름철에 $0.4 \sim 117.5 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $8.2 \mu\text{g L}^{-1}$), 가을철에 $1.4 \sim 25.8 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $6.4 \mu\text{g L}^{-1}$)로 여름철에 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 3). 특히, 6월 24일 정점 4에서 chlorophyll-*a* 농도가 $117.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 나타내었는데, 이때 식물플랑크톤 개체수의 99% 이상이 침편모류인 *Heterosigma akashiwo*였다(미발표 자료). 우리나라 내만의 chlorophyll-*a* 농도는 봄철과 가을철에 증가를 하는 bimodal pattern이거나, 봄철에 증가를 하는 unimodal pattern을 주로 보이고 있다(정 등 2007). 그러나 마산만 해역의 chlorophyll-*a*는 여름철에 높은 농도를 보이고 있어 일반적인 연안해의 변화와 다른 양상을 보였다. 마산만 해역은 폐쇄적인 만으로(이

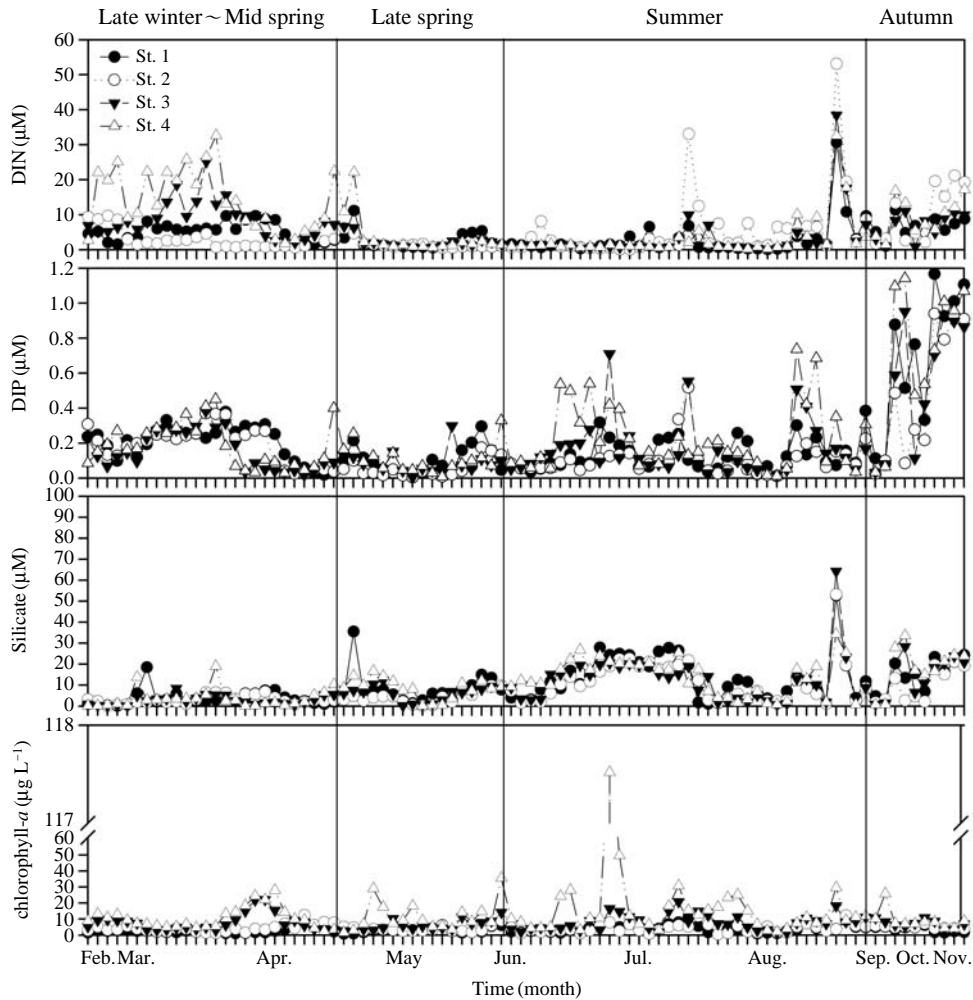


Fig. 3. Seasonal variations in nutrients (DIN, DIP and Silicate) and chlorophyll-*a* concentrations in Masan Bay.

등 1998), 외양의 해류에 의한 해수교환이 낮다(조와 채 1997). 따라서 상대적으로 해수 순환의 긴 정체시간 및 고 영양염류 조건에서 성장이 좋은 침편모조류, 유글레나조류 및 와편모조류와 같은 식물플랑크톤 군집이 증가 한다(이와 한 2007). 특히 여름철에는 집중강우에 따른 영양염류 공급 및 담수 유입에 따라 저 염분 조건에서 상대적으로 높은 성장을 보이는 종들의 빠른 증가에 따라 chlorophyll-*a*의 농도가 증가할 것으로 판단된다.

3. 영양염 비와 제한 영양염

식물플랑크톤의 성장에 중요한 원소는 질소(N), 인(P), 규소(Si)로, 각 영양염류의 비에 따라 제한 영양염류가 결정이 된다(e.g. Dufour *et al.* 1999). 마산만 해역에서 DIN 농도는 0.02~38.4 µM (평균 6.26 µM), DIP는 0.01~1.17 µM (0.29 µM), 규산염은 0.01~64.20 µM (10.54

µM) 범위를 보였으며, 늦겨울~봄 중순, 늦 봄, 여름~가을로 뚜렷한 차이를 보였다. 일반적으로 해양에서 N/P ratio가 16 이하이면 인이 상대적으로 풍부해 식물플랑크톤 성장에 DIN이 제한 영양염으로 작용할 수 있다. 본 조사해역에서 DIN/DIP ratio는 16 이상으로 DIP가 제한 요인으로 작용하고 있었다. 그러나 6~7월과 10~11월의 경우, 16 이하의 비율을 보여 DIN이 잠재적 제한 요인으로 작용할 것으로 판단된다(Fig. 4). 이와 한(2007)은 2003~2004년 겨울철과 가을철에 마산만에서 DIP 농도가 절대적으로 결핍되었다고 보고했는데, 본 조사에서는 봄철에 DIP 농도가 성장제한요인으로 작용하여 조사시기마다 다른 양상을 나타내었다. 그리고 최적 DIN/Silicate ratio는 1로(Rocha *et al.* 2002), 마산만 해역에서 DIN/Silicate ratio는 4월 중순까지 평균 5.29로 규산염이 성장 제한인자로 작용하는 것으로 나타났으며, 늦봄부터 가을까지 평균 0.45를 보여 DIN이 성장제한인자로 작

용하고 있었다(Fig. 4). 영양염류 변동에서 기술한 바와 같이, 규산염은 규조류 성장에 영향을 미치는 중요 인자

중 하나이다. 이와 한(2007)의 연구에 따르면 겨울철과 늦가을에 규조류의 대발생에 따라 규산염이 일시적으로 감소하여 성장제한요인으로 작용한다고 보고하였으나, 본 연구에서는 봄철에 성장제한요인으로 작용하고 있었다. 결과적으로 마산만 해역에서는 각 시기마다 다른 양상의 변화로, 봄철 중반까지는 규소와 인이 성장제한인자로 작용하며, 늦봄부터 가을까지는 질소원이 주 성장 제한요인으로 작용할 것으로 판단된다.

4. Chlorophyll-a 변화에 영향을 주는 환경요인

chlorophyll-a 농도가 어떠한 환경요인에 의해 영향을 받는지를 파악하기 위하여 계절별로 구분하여 단계적 다중회귀분석(stepwise multiple regression)을 실시하였다(Table 2). 먼저 늦겨울부터 봄철까지 chlorophyll-a 농도는 수온, 염분, COD, DIP의 변화에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타났다($R^2=0.72$, $F=24.88$, $p<0.001$). 이는 봄철 수온 상승이 식물플랑크톤 생체활동을 증진시키는 반면에 낮은 DIP 농도가 식물플랑크톤 증가를 억제하는 성장제한인자로서 작용하고 있어, 각기의 환경요인이 상호작용을 하고 있다고 판단된다. 여름철에는 봄철과 달리, 염분 및 COD, 강수량과 밀접한 관계를 보였는데, 이 결과는 여름철 집중강우에 따라 결정되는 영향인자들에 의해 chlorophyll-a가 빠르게 변화됨을 나타낸다($R^2=0.63$, $F=11.71$, $p<0.001$). 대부분의 식물플랑크톤 성장은 세포내의 생리활성 물질을 최대한으로 작용하기 위하여 많은 외부 에너지원이 필요하다. 따라서 여름철 고수온기는 일부 식물플랑크톤의 대발생을 야기시키지만, 집중강우는 성장요인에 제한적인 환경요인으로 작용했을 것이다. 그러나 가을철에는 영향을 미치는 환경요인

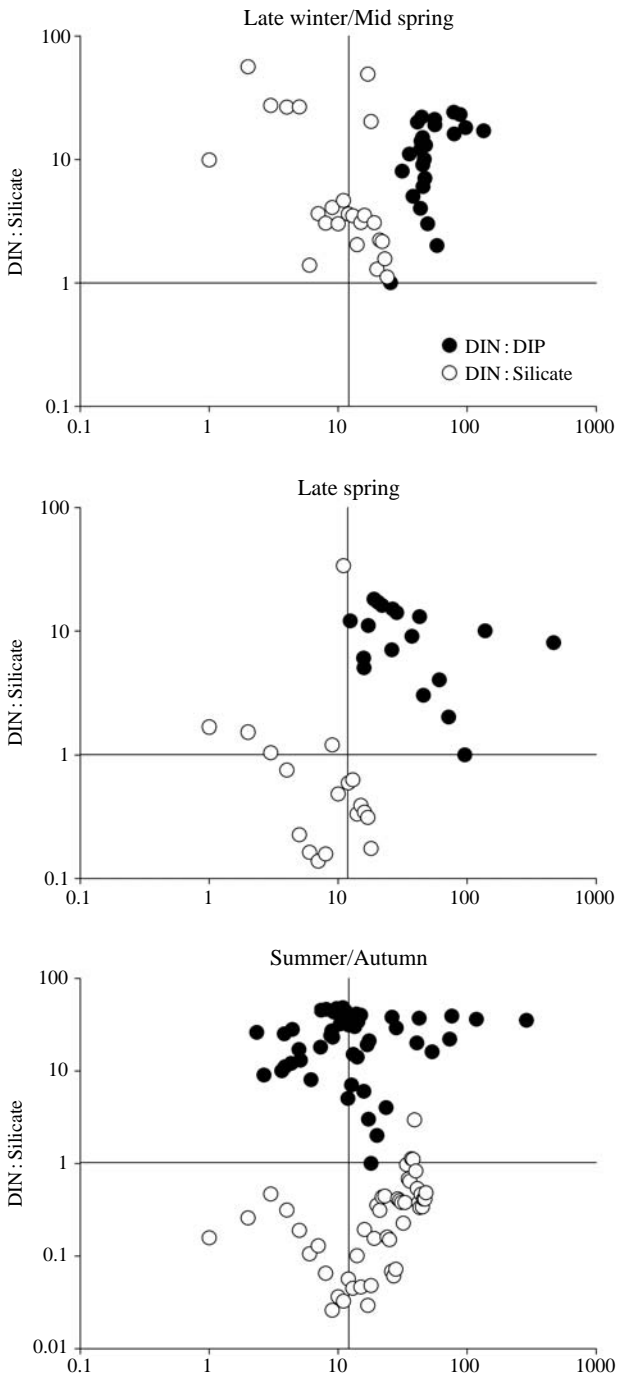


Fig. 4. N : P : Si molar ratios in Masan Bay for late winter and mid spring, for late spring and for summer and autumn. Figure key: molar quotients between the concentrations of potentially limiting nutrients are delimited in this logarithmic plot (log N : Si vs. log N : P) by the DIN : Silicate=1; DIN : DIP=16 lines, which define four different areas within the plot, with each one characterized by the potentially limiting nutrients in order of priority (Rocha et al. 2002).

Table 2. Multiple regression analysis of chlorophyll-a concentration as dependent variable and the environmental factors as independent variables

Variable	Late winter to mid spring (n=96)	Late spring (n=72)	Summer (n=148)	Autumn (n=44)
Temperature	0.178*	-0.364**	NS	NS
Salinity	-0.375***	-0.399**	0.354**	NS
COD	0.427***	NS	0.921***	NS
SS	NS	0.442***	NS	NS
DIP	-0.287*	NS	NS	NS
Silicate	NS	NS	NS	NS
DIN	NS	NS	NS	NS
Precipitation	NS	NS	0.167**	NS
F value	24.882***	11.706***	28.384***	NS
R ²	0.723	0.630	0.626	-

*, p<0.05; **, p<0.01; ***, p<0.001; SS, suspended solids; COD, chemical oxygen demand; DIN, dissolved inorganic nitrogen; DIP, dissolved inorganic phosphorus; NS, no significance

이 나타나지 않았다. 즉, 마산만 해역의 chlorophyll-*a*의 농도 변화는 각 계절별 환경 요인들이 다르게 작용하고 있었으나, 그 중 영양염의 결핍, 수온 변화 및 집중강우가 크게 영향을 미치고 있었다.

적 요

마산만의 수질변화와 chlorophyll-*a*의 관계를 밝히고자 이 해역을 대표할 수 있는 4개 정점에서 2010년 2월부터 2010년 11월까지 강우와 기온을 포함한 기후학적 요인, 물리·화학적 요인, 그리고 chlorophyll-*a*의 변화를 집중 조사하였다. 그 결과, 수온, 염분, SS, 규산염은 정점별 차이를 보이지 않았으며, COD 및 DIN은 마산만 내만으로 갈수록 증가하였다. 시계열적으로는 여름철 집중강우 시 마산만 지류 하천 및 낙동강을 통해 담수가 유입되면서 염분의 급강하 및 SS량과 COD의 증가가 나타났다. 영양염류 중 DIN은 여름철 집중강우 시 일시적으로 증가하는 양상을 제외하고는 낮은 농도를 보였고 DIP와 규산염 또한 DIN과 유사한 양상을 보였다. 마산만에서 식물플랑크톤 성장에 영향을 주는 영양염류는 봄철 중반까지 규소와 인이 성장제한인자로 작용하고, 늦봄부터 가을까지는 질소원이 주 성장제한요인으로 작용할 것으로 판단된다. 다중회귀분석을 실시한 결과, 늦겨울부터 봄철까지 chlorophyll-*a* 농도는 수온, 염분, COD, DIP의 변화에 의해 영향을 받고 있었다. 여름철에는 봄철과 달리, 염분 및 COD, 강수량이 영향을 주고 있어, 여름철 집중강우에 따른 영향인자들에 의해 chlorophyll-*a*가 빠르게 변화됨을 알 수 있었다. 따라서 마산만 해역의 chlorophyll-*a*의 변화는 영양염류와 같은 화학적 인자의 영향과 함께, 수온 및 강수와 같은 물리적 인자에 의해 크게 영향을 받고 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양생태계 건강지수 개발(PE98582)” 사업에 의해 수행되었으며, 본 조사에 도움을 주신 김소영 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

강시환, 유승협, 김상익, 오병철, 박광순. 2001. 마산만 해양방

- 류 혼합구역에서의 하수농도 분포 변화. 해양환경공학회. 4:15-24.
- 곽승국, 최만영, 조경제. 2001. 마산-진해만에서 적조원인 편모조류의 분포 발생빈도. *Algae* 16:315-323.
- 국토해양부. 2010. 해양환경공정시험기준. 461pp.
- 손재학, 안태영, 김상진. 2000. 마산만과 행암만 수층의 종속 영양세균과 엽록소 *a* 함량 분포에 미치는 환경요인. 해양환경공학회. 3:66-75.
- 이주연, 한명수. 2007. 마산만 식물플랑크톤의 대발생 양상의 변화와 군집 동태. 한국해양학회지「바다」. 12:147-158.
- 이찬원, 권영택, 양기섭. 1998. 폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역환경변화. 한국해양환경공학회. 10:60-70.
- 임동일, 최진용, 정희수, 최현우, 김영옥. 2007. 한국 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 자연적 배경농도 연구. *Ocean and Polar Research* 29:1-12.
- 임동일, 최현우, 김영옥, 정희수, 강영실. 2011. 한국 연안역 수질성분들(COD, DIN, DIP, chlorophyll-*a*)의 해역별 농도 특성과 등급화: 통계적 접근. *Ocean and Polar Research* 33:13-20.
- 정승원, 권오운, 주형민, 이진환. 2007. 2000~2007년 통영바다목장해역에서 환경요인의 영향에 따른 식물플랑크톤 현존량의 변화. *환경생물*. 25:303-312.
- 조창환. 1978. 진해만의 *Gonyaulax* 적조. *Bull. Korean Fish. Soc.* 11:111-114.
- 조홍연, 채장원. 1997. 마산만의 장기간 물수지 및 해수교환 특성. 한국해양환경공학회. 9:74-85.
- 조홍연, 채장원. 1998. 진해, 마산만 오염부하량의 특성분석. 한국해양환경공학회. 10:132-140.
- 최만영, 곽승국, 조경제. 2000. 마산, 진해만에서 *Prorocentrum* 개체군의 발아 양상과 분포. *환경생물*. 18:447-456.
- Brzezinski MA, DR Phillips, FP Chavez, GE Friederich and RC Dugdale. 1997. Silica production in the Monterey, California, upwelling system. *Limnol. Oceanogr.* 42:1694-1705.
- Dufour P, L Charpy, S Bonnet and N Garcia. 1999. Phytoplankton nutrient control in the oligotrophic South Pacific subtropical gyre (Tuamotu Archipelago). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 179:285-290.
- Furuya K and R Marumo. 1983. The structure of the phytoplankton community in the subsurface chlorophyll maxima in the western North Pacific Ocean. *J. Plankton Res.* 5: 393-406.
- Goffart A, JH Hecq and L Prieur. 1995. Controle du phytoplankton du bassin ligure par le front ligure-provençal (secteur corse). *Oceanology Acta* 18:329-342.
- Kang CK, PJ Kim, WC Lee and PY Lee. 1999. Nutrients and phytoplankton blooms in the southern coastal waters of Korea: I. the elemental composition of C, N, and P in particulate matter in the coastal Bay systems. *J. Oceanogr.* 34: 86-94.

Perry MJ and RW Eppley. 1981. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. Part A*. 28:39-49.

Rocha C, H Galvão and A Barbosa. 2002. Role of transient silicon limitation in the development of cyanobacteria blooms in the Guadiana estuary, South-Western Iberia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 228:35-45.

Sun J and D Liu. 2003. Geometric models for calculating cell

biovolume and surface area for phytoplankton. *J. Plankton Res.* 25:133-346.

Yang DB and KW Lee. 1983. Vertical distribution and diurnal variations of dissolved nutrients and chlorophyll *a* in Masan Bay. *Bull. KORDI*. 5:9-13.

Manuscript Received: March 12, 2011

Revision Accepted: May 5, 2011

Responsible Editor: Hak Young Lee