

마산-진해만의 수질 부영양화 및 계절 변동

조경제 · 최만영 · 광승국 · 임성호¹ · 김대윤¹ · 박종규² · 김영의¹
인제대학교 생물학과, ¹인제대학교 환경학과, ²인제대학교 환경연구소

Eutrophication and Seasonal Variation of Water Quality in Masan-Jinhae Bay

KYUNG-JE CHO, MAN YOUNG CHOI, SEUNG KOOK KWAK, SUNG HO IM¹, DAE YUN KIM¹
JONG GYU PARK² AND YOUNG EUI KIM¹

Department of Biology, Inje University, Kimhae 621-749, Korea

¹*Department of Environment, Inje University, Kimhae 621-749, Korea*

²*Environment Institute, Inje University, Kimhae 621-749, Korea*

마산-진해만에서 1996년 1월부터 1997년 8월까지 영양염류, 용존산소, 해수 투명도 등 수질의 부영양화 요인과 식물플랑크톤 생물량의 수직변동, 공간분포 및 계절변동 등을 조사하였다. 식물플랑크톤은 4월부터 10월까지 번무하였으며, 이 기간에는 편모조류가 단독으로 발생하거나 여러 종이 혼합 발생하는 등 매우 역동적인 양상을 보였다. 식물플랑크톤 대발생 시기에는 염분이 감소하였고, 편모조류의 번무로 수색이 변하거나 물의 투명도가 떨어졌다. 여름에 하층은 빈산소상태였으나 상층은 산소의 과포화상태로서 상·하층에 용존산소의 성층화가 형성되었고, 그 구배가 컸다. 반면 겨울에는 영양염류의 수직 분포가 균일하였고, 마산 내만에서 진해 외만에 걸쳐 영양염류의 수평적 구배가 발달하였다. 마산-진해만 수질은 여름에는 저질 퇴적층에서 용출되는 영양염류의 영향을 많이 받았으나, 겨울에는 마산시와 창원시 등 주변 집수역에서 유입되는 오·폐수의 영향을 주로 받는 것으로 추정되었다. 과거 마산-진해만 일원의 수질 분석 자료를 수집하여 마산만 돌섬과 부도 사이의 수질을 연 평균값으로 표준화시킨 결과, COD와 PO₄가 비교 가능하였다. 1970년부터 1990년까지 마산만에서 COD와 PO₄ 농도는 점진적으로 증가하였으나, 1991년 이후 다소 둔화되거나 감소한 것으로 나타났다. 1991년부터 1994년까지 마산 내만에서 행한 저질 퇴적층의 준설이 이 지역의 수질 악화를 다소 완화시킨 것으로 추정된다.

Water quality of Masan-Jinhae Bay was monitored from January 1996 to August 1997. The monitoring focused on the spatial and vertical gradients and seasonal changes of eutrophication parameters such as nutrients, DO and water transparency. Flagellate phytoplanktons persistently bloomed from April to October with monospecific or mixed algal blooms and dynamic algal successions were observed in this area. Algal blooms were highly correlated with salinity drops and made the water less transparent. Stratification of oxygen content was persistent through summer and oligo-oxygenation was developed in the bottom waters. Nutrient gradients were consistently maintained through the depth in summer and through spatial distribution from inner Masan Bay to outer Jinhae Bay in winter. Except the rainfall seasons, water quality was under the influence of the waste waters discharged from watershed around the Masan Bay. The waste waters would act as the primary factor for the water quality deterioration of the bay. Literature data for eutrophication were gathered and analyzed to review the water quality trends of the Masan and Jinhae bays since 1970. Annual mean COD and phosphate concentration consistently increased from 1975 to 1990 and decreased or dropped after 1991. The sediment of inner part of Masan Bay was dredged from 1991 to 1994 as a decontamination process and it is assumed that the dredging has weakened more or less the deterioration trend of the water quality of the bay.

서 론

남해 연안에서는 마산-진해만 일원 해역의 수질 오염도가 가장 높고, 식물플랑크톤의 발생강도가 가장 큰 곳이다. 부영양화의 최적 환경 조건은 외양과 해수 교환이 적은 폐쇄성 내만으로

서, 육지에서 오·폐수 유입과 저질 퇴적층에서 영양염류 용출이 활발하여 식물플랑크톤 생장에 필요한 영양염류와 각종 미량원소가 풍부하며, 일조량이 충분하고, 해수의 온도가 생장에 적합한 곳이다(국립수산진흥원, 1997). 식물플랑크톤의 발생 양상을 보면, 1980년까지는 소모도 내측 마산만에서만 대발생하

였으나, 1981년부터는 진해만까지 확산되었고, 그 기간도 일주일 내외의 단기에서 7~9월로 장기간 지속되었다(김, 1989). 마산-진해만의 해양 기초조사는 1970년대부터 국립수산진흥원, 서울대학교 및 한양대학교 연구팀에 의해 시작되었고, 국립수산진흥원은 "연안 어장 보전을 위한 환경오염 조사연구"의 일환으로 진해만을 포함하여 전국 연안의 수질을 현재까지 모니터링하고 있다. 진해만 일대의 조사 연구는 전술한 세 기관 외에 한국해양연구소가 "적조 모니터링 시스템" 개발을 위한 조사를 하였고(해양개발연구소, 1980; 한국해양연구소, 1982), 경남대학교 연구팀은 마산만 저질 퇴적토의 준설에 대한 평가 기초자료로서 마산만 일대 하천의 유입부하량과 저질도에 대한 조사를 하였다(이와 권, 1994). 한편, 식물플랑크톤에 관한 조사는 그 발생규모와 계절 변동을 중심으로, 대체로 군집 수준에서 수질과 함께 다루어져 왔다(박과 김, 1967; 유와 이, 1976; Yoo and Lee, 1979, 1980a, 1980b; 이 등, 1981; 박, 1982; 김 등, 1993). 수질환경은 질소와 인 등 주로 무기 영양염류의 정량분석에 치중하였으며, 물리화학적 요인과 적조생물의 상호관련성을 규명하기 위하여 상관분석, 다중회귀분석 및 요인분석 등 통계분석법이 이용되기도 하였다(하, 1985; Yoo, 1991).

금번 조사는 마산-진해만 일원의 수질과 수심, 공간 및 계절에 따른 수질 환경의 변동을 밝히는데 중점을 두었다. 본 연구는 마산-진해만에서 식물플랑크톤의 개체군 중심의 변동에 대한 조사의 일환으로 이루어졌다. 또한 지난 25년간 마산-진해만의 수질 자료를 수집하여 그 연 평균값으로서 마산-진해만의 수질 부영양화 추이를 밝히고자 하였다.

조사지 개황

진해만 해역은 해안선의 굴곡이 심하고 거제도 와 가덕도 같은 큰 섬으로 둘러싸여 있으며, 외양과 내만의 혼합 정도가 커

난류 형성이나 기상 조건에 따라서는 해황의 변동이 심한 곳이다. 마산-진해만 전역의 해수면적은 637 km²이고, 만 주변 유역의 면적은 1,008 km²이다(환경처, 1991). 만 주변의 집수유역은 넓지는 않으나, 마산시, 창원시 및 진해시 등 대도시가 발달한 인구 밀집지로서 어느 지역보다도 오·폐수 부하량이 많은 곳이다. 마산만은 세 도시와 접하고 있는 좁은 만으로 10여 개의 소하천을 통하여 마산시와 창원시의 생활하수와 산업폐수가 유입되고 있다. 1960년대 이후 임해공업단지가 조성되었고, 마산·창원 거주 인구가 1975년 약 41만 명에서 1990년 말에는 115만여 명으로 증가하였고, 이에 따른 생활하수 및 산업폐수의 증가로 마산만 수질이 크게 악화되어 왔다(국립수산진흥원, 1997). 마산·창원시의 오수를 처리하는 덕동 하수처리장과 분뇨처리장(마산시 합포구 덕동리 소재, 1993년 11월부터 가동)의 처리율은 하수 발생량의 40%에 불과하며, 나머지는 하천을 통하여 마산만으로 유입되고 있다. 더구나 하수처리도 1차 침전처리에 그쳐 오염물질의 제거율이 낮으며, 최종 방류수를 육계 부락 앞 바다까지 도수하여 마산만으로 방류하고 있다(Fig. 1). 2차 하수처리시설을 오는 2001년에 계획하고 있어 당분간 생활하수에 의한 유기오염은 증가할 것으로 예상된다. 마산만 일원에서 생활하수가 유입되는 주요 하천은 창원천, 남천, 산호천, 회원천 등으로 규모가 작은 소하천이다. 이들 하천을 통하여 유입되는 COD, TN, TP의 일일 부하량(93~94년 기준)은 각각 41 ton/day, 15 ton/day 및 1 ton/day에 이르며, 창원지역에서 유입되는 창원천과 남천 등의 유입부하량은 총량의 약 40%를, 삼호천과 회원천 등 마산지역이 약 32%, 덕동하수처리장에서 27%를 차지한다(이와 권, 1994).

마산만에서도 돌섬 안쪽 내만은 해수 유동 속도가 10 cm/s 이하로서 유입된 도시 하·오수의 체류시간이 10~12 시간에 달하고, COD 등 오염물질의 90%가 침전되어 일종의 하·오수의 침전조 역할을 하게 된다(이와 권, 1994; 한국해양연구소,

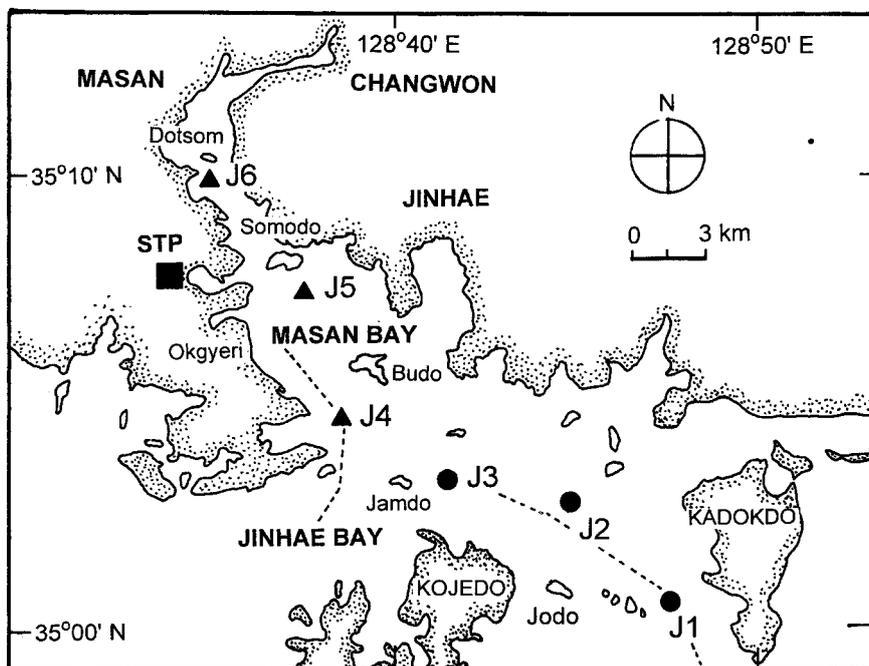


Fig. 1. Sampling stations for monitoring the water quality and algal blooms in Masan Bay (▲) and Jinhae Bay (●). Black rectangle (■) indicates the sewage treatment plant (STP). Upper and lower dotted lines represent Budo and Kadok channels, respectively.

1997). 마산 내만의 하층은 여름철에 빈산소 상태를 이루게 되며, 침전된 오염물질이 빈산소 조건에서 분해되므로 강력한 혐기성 상태를 이루게 될 것이다. 따라서, 본 조사에서는 하천의 영향이 큰 돌섬 안쪽 해역은 조사 대상에서 제외하였다. 그러나 돌섬 바깥쪽 해역도 저산소 수괴가 상습적으로 발생하는 오염 수역으로 변화하였다. 마산-진해만 일원은 수질 오염에 취약하나, 양식 조건이 좋고 영양염류가 풍부하여 오래전부터 진주담치, 굴, 피조개 등 양식업이 발달하였다. 진주담치와 굴 양식장은 1,100 ha, 피조개 양식장은 2,500 ha에 이르는 등, 남해안에서도 특히 패류양식 밀도가 매우 높은 곳이다(경상남도, 1997). 한편, 집약적인 대규모 어류양식이 이루어지고 단위 면적 당 양식 물량도 높아 양어장으로부터 생기는 찌꺼기, 배설물 및 현탁 물질이 자정작용의 한계를 초과함으로써, 수질이나 해저 퇴적물 환경이 급격히 나빠지고 생산성이 저하되는 자가오염 현상도 일부 어장에서 일어나고 있다(박 등, 1982).

마산시는 마산만의 수질을 개선시키기 위하여 1990년 6월부터 1994년 12월까지 4 년에 걸쳐 총 287억 원의 공사비용을 들여 저질 퇴적물 211만 톤을 준설하여 제거하였다(이와 권, 1994). 퇴적물 준설은 하천의 마산만 유입부를 중심으로 이루어졌다. 준설 기간동안 COD와 PO₄ 농도가 다소 감소하였고 투명도가 높아지는 등 개선 효과가 나타났으나, 질소 농도는 뚜렷한 변동이 없었다(이와 권, 1994). 이러한 자체 평가에도 불구하고 마산만 준설에 따른 수질 개선 효과에 대해서는 아직까지 정확한 평가를 내리지 못하고 있다. 한편, 환경부는 이미 1982년에 마산-진해만을 연안 오염방지를 위한 특별관리해역으로 지정하였고, 이 지역의 13 개 지점에서 연 6 회 수질 모니터를 실시하고 있다(환경부, 1996).

진해만의 해수교환은 대부분 가덕수도를 통해 이루어진다. 진해만의 조석주기는 뚜렷한 반일주조이며, 창조시 가덕수도로 유입된 해수는 잠도 부근에서 북서진하여 주류는 진해만의 서부해역으로 유입되고, 일부가 마산만으로 흐른다. 최대유속은 약 70 cm/s로 잠도와 저도 사이에서 나타나며, 낙조시는 반대방향으로 유속은 낙조시가 크게 나타난다(강 등, 1989). 마산만 내의 일일조차는 대조시 2 m, 소조시 1 m 내외이다. 만 내의 최대 유속은 수도 중앙과 서부의 4 m 이하의 상층에서 나타나고, 최대 유입속도는 24 cm/s, 최대 유출속도는 15 cm/s이다. 그리고 4 m 이상의 하층에서는 유속이 약하여 0~2 cm/s에 불과하다. 진해만은 최대유속이 141 cm/s이며, 만 외부로의 해수유동이 우세하다. 그리고 상층에서의 조석은 바람의 영향을 크게 받는다.

마산만과 진해만 동부 해역에서 각각 세 지점을 선정하여 수질환경과 식물플랑크톤의 변동을 모니터링하였다(Fig. 1). 마산만에서 진해만의 동부 해역을 따라 흐르는 부도수도-가덕수도를 따라 6 개 조사 지점을 정하였다. 진해만 동부 해역의 J1, J2, J3 정점을 잇는 수도 지역은 수심이 24~31 m 범위이고, 마산만의 J4, J5, J6 정점을 잇는 지역의 수심은 9~15 m이나, 마산만 내 소모도 서쪽의 수심은 24 m이다. J1, J2, J3 정점에서는 25 m 깊이까지 5 m 간격(일부 2.5 m 깊이에서 채취)으로 분석 시료를 채집하였고, J4, J5, J6 정점에서는 10 m 깊이까지 5 m 간격(일부 2.5 m 깊이에서 채취)으로 채취하였다. 조사 기간은 1996년 1월부터 1997년 8월까지였으며, 조사 간격은 적조 발생기간에는 1 주 간격, 비발생 기간에는 1 달 간격을 원칙으로 했다.

방법 및 재료

1996년 1월부터 1997년 8월까지 20 개월간에 걸쳐 총 52 회 의 현장 조사를 실시하였고, 매달 또는 적조 번무시는 매 주 채집하였다. 3 l Van Dorn 또는 5 l Niskin 채수기로 시료를 채수 하여 냉동실에 보관하였다가 분석하였다. 수온과 염분은 CTD meter(SBE 19 또는 SBE 25, Sea-Bird Electronics Inc.)로 측정하였고 pH는 pH meter(Orion 230 A)로, DO는 DO meter(YSI-58 또는 YSI 59)로 측정하였다. 투명도는 Secchi 백색 원판(직경 20 cm)으로 측정하였다. NH₄, NO₃, NO₂, PO₄, SiO₂ 등 무기 영양염류는 수질자동 분석기(TRACCS 2000, Bran+Lüebbe, GmbH.)로 정량하였고, 분석법은 Strickland and Parsons(1972)의 비색 정량법을 따랐다.

결 과

1996년 1월부터 1997년 8월까지 마산-진해만 6 개 정점의 수질 분석 결과 중에서 진해만의 J1 정점과 마산만의 J5 정점에서 수질의 연중 변동은 Figs. 3, 4와 같다. 마산만과 진해만에서 수질 각 항목의 계절 및 수심별 연중 변동(Figs. 3, 4)을 나타냈고, 계절적으로 크게 대비되는 겨울(97년 1월)과 여름(97년 7월)에 있어서 변동 양상(Figs. 5, 6)으로 각각 구분하였다. 조사기간 내 각 조사 지점에서 수질 항목의 평균 농도를 보면 다음과 같다.

연 평균농도

1996년 1월부터 1997년 8월까지 J1~J6 정점에서 조사한 수질 각 항목의 평균 농도와 표준편차를 나타내면 Fig. 2와 같다. 수온은 지점간 큰 차이가 없었다. pH는 정점 J1의 8.4(±0.4)에서 정점 J6의 8.7(±0.4)로 다소 증가하였다. DO도 정점 J1에서 J6까지 평균값은 9.2 mg/l, 9.2 mg/l, 9.7 mg/l, 10.9 mg/l, 10.7 mg/l, 10.6 mg/l로 증가하였다. 그러나 육지에서 유입되는 담수와 강우의 영향으로 염분은 정점 J1의 31.6‰에서 J6의 29.7‰로 감소하였다. 식물플랑크톤의 chl-*a* 농도는 진해만 J1 정점의 5.7 µg/l, J2 정점의 7.0 µg/l, J3 정점의 8.5 µg/l, J4 정점의 15.9 µg/l, J5 정점의 26.0 µg/l, 마산 내만 J6 정점의 28.1 µg/l로 크게 증가한 반면, 투명도는 진해만 J1 정점에서 평균 4.3 m 였으나, J6 정점에서는 2.0 m로 감소하였다. 물의 투명도와 chl-*a* 농도는 역상관 관계로서 식물플랑크톤이 투명도를 떨어뜨리는 가장 중요한 요소로 추정되었다. NH₄와 NO₃의 평균 농도는 각각 정점 J1의 66 µg N/l 및 77 µg N/l에서 정점 J6의 255 µg N/l 및 206 µg N/l로 점진적으로 증가하였다. 질소와 인의 영양염류는 진해 외만에서 마산 내만으로 갈수록 증가하였으나, SiO₂의 변동은 달랐다. J1, J6 정점에서 SiO₂의 평균 농도는 각각 451 µg Si/l 및 426 µg Si/l이었으나, 정점 J2~J5에서 192~264 µg Si/l 범위였다.

일반 수질항목

수온은 상층의 경우 여름(7월~8월)에는 24.2~27.9°C(평균 25.5°C) 범위였고, 겨울(12월~1월)에는 5.0~12.9°C(평균 8.3°C)

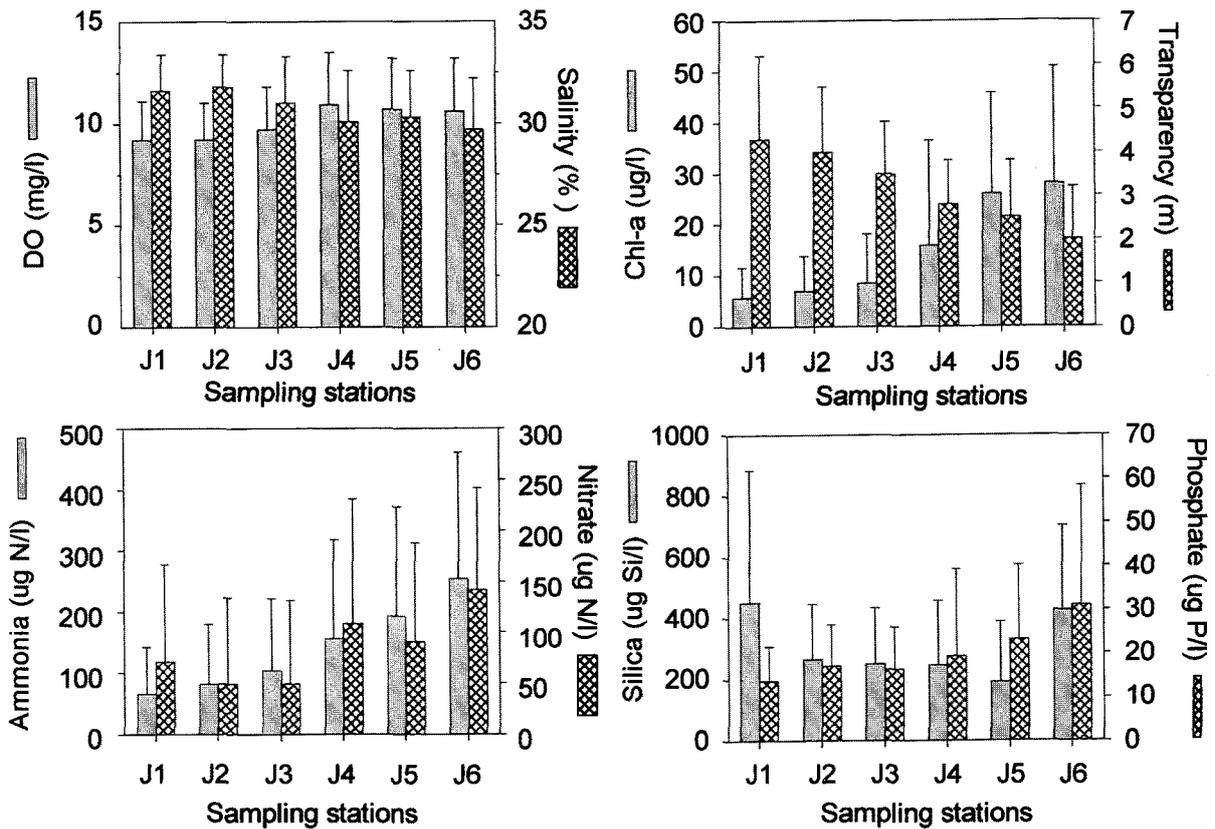


Fig. 2. Average concentration of DO, salinity, chl-a, transparency and inorganic nutrients (ammonia, nitrate, phosphate and silica) of surface water in the Masan-Jinhae Bay from January 1996 to August 1997 (sampling numbers=29-40).

범위로서 연중 수온의 차는 평균 17.2°C였다. 하층에서 수온의 최대 또는 최소값이 나타난 시기는 상층과 같았으나 수온의 차는 11.9°C로서 상층보다 작았다. 여름철에는 상층 수온의 상승으로 해수의 수직 혼합이 잘 일어나지 않기 때문에 상·하층간의 수온 차이가 커져 7~8월에는 17.0~25.7°C였으나 겨울에는 층간 수온 차이가 1°C 이하였다(Fig. 3A). 겨울에 상·하층간 수온이 일정하게 유지되는 것은 해수의 수직 혼합이 원활하게 일어나기 때문일 것이다.

pH는 연중 7.0~9.0 범위(평균 8.3)였다. 마산만에서는 1996년 8.0~9.1(평균 8.9), 1997년에 8.5~9.6로서 진해만 보다 높았고, J6 정점에서 연 평균 pH가 8.7로 가장 높았다. 상층의 pH는 식물플랑크톤의 광합성으로 여름철에 높고 겨울철에는 비교적 낮았으나, 1997년 1~2월에는 마산-진해만 일대에서 pH가 특히 높게 나타나기도 하였다. 수심에 따른 pH의 변동은 여름에는 크고 겨울에는 작았다. 1997년 1월에는 J6 정점에서 상·하층 pH 값이 8.96~8.99의 범위로 변동이 미미한 반면, 7월에는 상층과 하층의 pH는 각각 9.0, 8.2였다(Fig. 5). 1월과 7월에 있어서 pH의 공간적 변동 양상은 전술한 수온과 유사하여 여름에는 상하 성층화 현상이 뚜렷하였다.

마산만 상층에서 DO의 연간 변동 범위는 6.2~15.8 mg/l(포화도 93~214%)였고, 하층 DO의 연 변동 범위는 3.9~11.8 mg/l였다(Figs. 3C, 3H). 진해만(정점 J1)에서 상하층 DO의 변동은 여름에 컸고(최대 최저값의 차이는 8.4 mg/l), 마산만(정점 J5)에서는 1996년 4월과 7월에 특히 컸다. 4월은 *Prorocentrum mini-*

*mum*과 *Eutreptiella gymnastica* 등이 번무했던 시기였고, 7월에는 *Prorocentrum spp.*가 대발생한 시점으로서 하층에서 빈산소 수괴는 식물플랑크톤의 대발생 시기와 일치하였다. 그러나 하층의 DO 농도는 봄철에서 여름으로 갈수록 감소하였고, 가을에 다시 증가하는 양상을 보였다. 마산만에서 하층 DO 농도는 5월 이후 4.9 mg/l 이하였고, 8월에는 4.1 mg/l로서 이러한 빈산소 상태는 9월까지 계속되었다.

여름과 겨울철에 마산-진해만에서 DO의 수직 및 수평분포는 Fig. 5와 같다. 1월에 DO는 상·하층간 수직 변동이 1.0 mg/l 이하인 반면, 조사 지점간 DO 변동폭은 3.5 mg/l였다. 7월에는 상층의 DO는 최대 14.7 mg/l로 과포화상태(213%)였고 하층의 DO는 최저 2.9 mg/l로 상하 성층화가 뚜렷하였다. 수중생물의 생존 한계농도를 5 mg/l로 보았을 때(Yoshida, 1973), 한계농도 이하의 빈산소 수괴는 마산만(평균 수심 13 m)에서 10 m 이하, 진해만(평균 수심 34 m)에서는 20 m 이하에서 나타났다.

조사기간 염분도는 27.9~35.0‰(평균 32.7‰) 범위였다. 마산-진해만의 염분은 강우량과 육수 유입의 영향이 큰 것으로 나타났다. 강우량이 적은 겨울에는 염분도가 비교적 높았으며(진해만 33.9~34.4‰, 마산만 32.5~32.9‰), 강우량이 많은 여름에는 이보다 낮았다(진해만 29.8~33.4‰, 마산만 29.5~31.6‰). 한편 염분의 수직분포에 있어서 진해만에서는 1996년 5월, 1997년 7~8월에 상·하층간 염분변화가 컸으며(28.2~34.8‰), 마산만에서는 1996년 7~8월과 1997년 7~8월에 크게 나타났다(29.5~34.3‰)(Figs. 4D, 4I). 그 외 기간에는 상·하

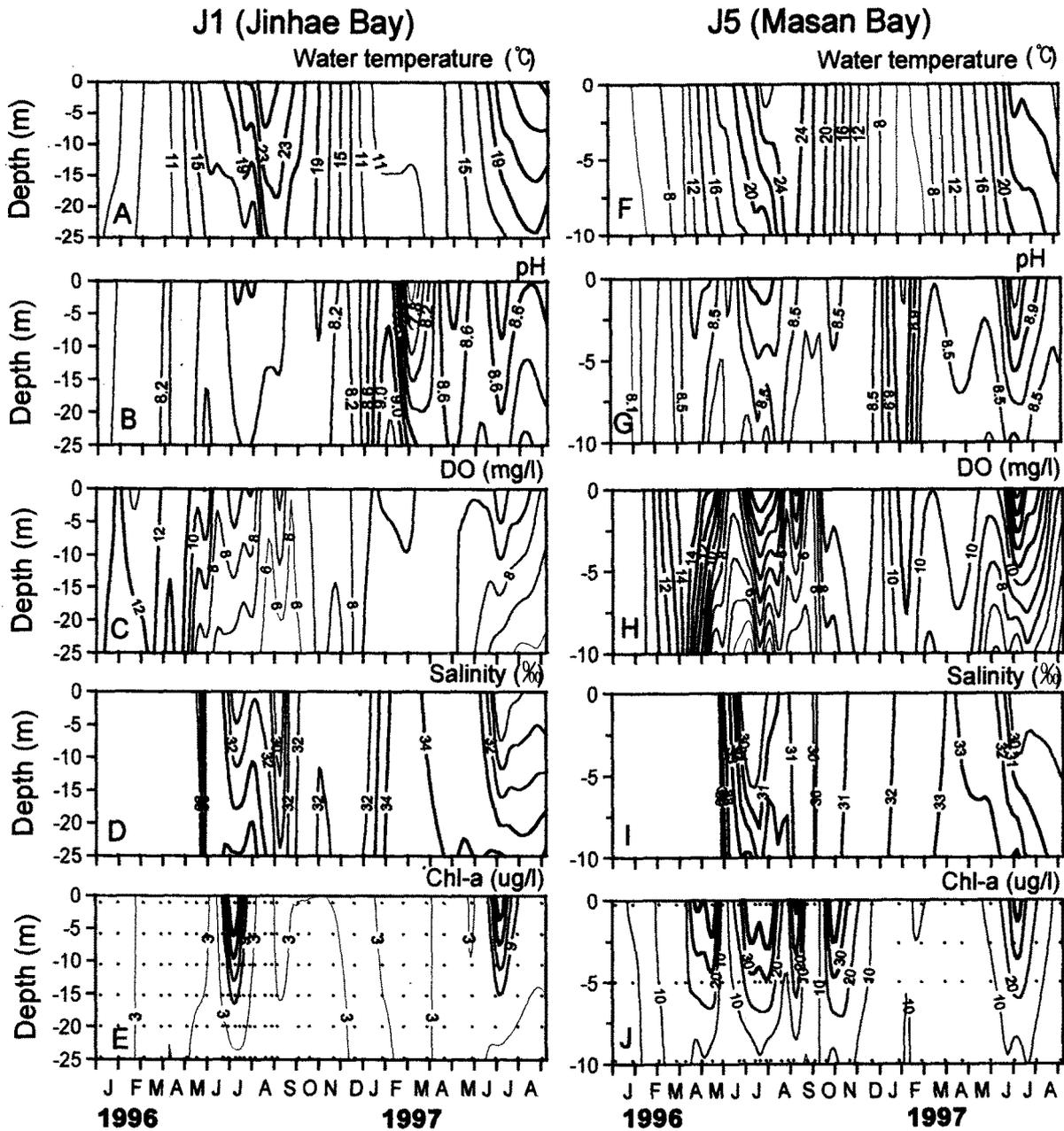


Fig. 3. Season-depth profiles for water temperature, pH, DO, salinity and chl-a concentration in Jinhae and Masan bays from January 1996 to August 1997.

층간 염분도의 차이는 4‰ 이하였다.

Secchi 원판으로 측정된 마산-진해만에서 물의 투명도는 최소 0.9 m, 최대 9.0 m였으며, 연평균 투명도는 3.5 m였다. 투명도의 변동은 매우 불규칙하였으나, 투명도와 chl-a 농도는 역상관계(상관계수는 0.64, n=139)로서 식물플랑크톤이 투명도를 떨어뜨리는 주요 요인으로 추정된다. 투명도는 식물플랑크톤 뿐만 아니라 수중의 입자성 유기물질의 영향을 받으므로 장마기인 7월에는 투명도가 특히 1 m 내외로 낮을 때가 있었으며, 겨울과 7월을 전후하여 투명도가 높아지는 경향성이 뚜렷하였다(평균 5.5 m). 마산 내만에서의 식물플랑크톤의 번무와 육상으로부터의 각종 부유물 유입이 투명도를 떨어뜨리는 요인이

되고 있다. 그러나 갑자기 수색이 좋아져 투명도가 높아지는 경우가 있었는데, 1996년 9월 30일 마산만 일대에 청수대가 유입되어 물의 투명도가 5.5 m로 높아지는 것을 관찰하였다.

무기영양염류

NH₄는 6월과 10월에 높게 나타났고, 7월 장마기를 전후하여 증가하는 것이 관찰되었다(Fig. 4F). 여름철 NH₄의 농도가 증가하고, 특히 하층 NH₄ 농도가 증가하는 것으로 보아 저질 퇴적층에서 많은 양의 NH₄가 용출되는 것으로 추정된다. 이 기간에 상층에서는 평균 123 µg N/l였고 하층에서는 231 µg N/l로서 상·하층간 농도 차이가 컸다. 나머지 기간에는 NH₄의 수직 구배가

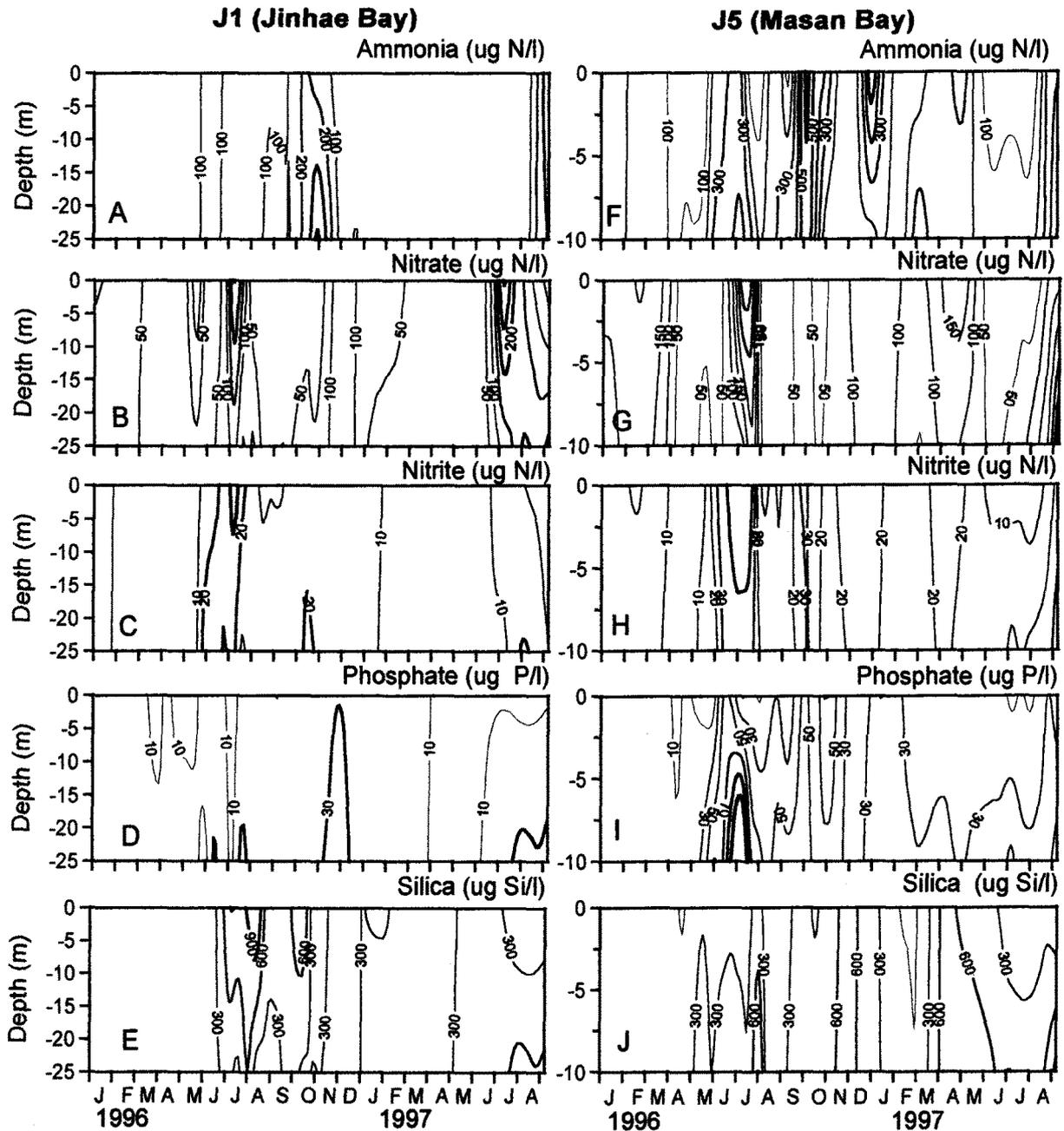


Fig. 4. Season-depth profiles for concentration of ammonium, nitrate, nitrite, phosphate and silica in Jinhae and Masan bays from January 1996 to August 1997.

뚜렷하지 않았다. NH_4 농도가 가장 낮았던 시기는 1월로 마산만(정점 J5)에서는 $153 \mu g N/l$ 이하였고, 진해만(정점 J1)에서는 $23 \mu g N/l$ 이하였다.

겨울(1월)과 여름(7월) NH_4 의 변동은 Fig. 6과 같다. 1월에는 수심에 따른 NH_4 의 수직변동보다는($120 \sim 210 \mu g N/l$) 조사지점 간 변동의 폭이 훨씬 커($10 \sim 210 \mu g N/l$), 마산 내만에서 육상 폐수의 유입 영향이 큰 것으로 나타났다. 반면 7월에는 상층수의 NH_4 농도가 $0 \sim 30 \mu g N/l$ 에 불과했으나, 하층에는 $60 \sim 240 \mu g N/l$ 범위로 상층보다 8~60 배 높게 나타나 저질 퇴적층이 NH_4 의 주요 부하원인임을 알 수 있었다. 그러나 NH_4 의 수직 구배는 진

해만 외해 쪽으로 갈수록 크게 약화되었다.

NO_3 는 6월에 특히 높았고, NH_4 농도가 높은 시기에는 NO_3 는 대체로 낮았다(Fig. 4). 1997년 6~7월에 정점 J1에서 상층의 NO_3 농도는 하층보다 1.4~3.7 배 높았고, 정점 J5에서 상층의 NO_3 농도는 하층보다 1.2~1.5 배 높았다(Figs. 4B, 4G). 그러나 여름을 제외한 기간에는 상·하층간 농도 차이가 $20 \mu g N/l$ 이하였다.

1월과 7월의 NO_3 변동을 대비시킨 결과는 Fig. 6과 같다. 조사지점 및 수심별 변화양상은 NH_4 와 유사하였으며, 1월에는 정점 J1에서 NO_3 농도가 $20 \mu g N/l$ 였으나 마산 내만의 정점 J6로 갈수록

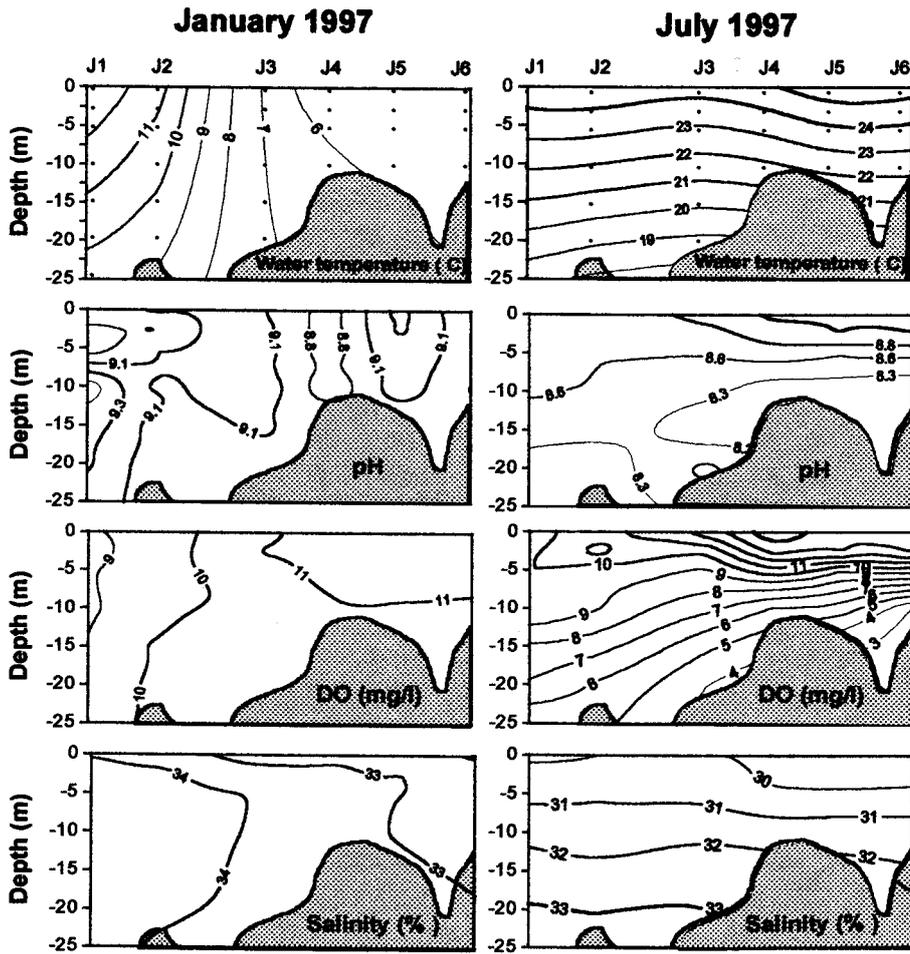


Fig. 5. Station-depth profiles of water temperature, pH, DO and salinity along the sampling stations in the Masan-Jinhae Bay on January 30, 1997 and July 20, 1997.

210 $\mu\text{g N/l}$ 로 크게 증가하였으며, 여름에는 해수표면의 20~30 $\mu\text{g N/l}$ 에서 하층의 80~120 $\mu\text{g N/l}$ 로 7~9 배 이상 증가하였다. 하층에서 NO_3^- 농도는 마산만 쪽보다 진해만 쪽에서 더 높으나 마산 내만 하층에서 NH_4^+ 농도가 진해만 쪽보다 2 배 이상 더 높은 것과는 대조를 이루었다. 한편, NO_2^- 는 NO_3^- 농도의 1/5~1/10 범위였으나 시기, 조사지점 및 수심별 변동양상은 NO_3^- 와 유사하였다.

마산-진해만의 상층에서 PO_4^{3-} 농도범위는 5~80 $\mu\text{g P/l}$ 였고, 특히 7~10월에 변화가 심하였다. 하층에서 PO_4^{3-} 의 농도범위는 5~120 $\mu\text{g P/l}$ 로 상층보다 변화의 폭이 컸다. 그러나 진해만 외해 쪽에서는 상층과 하층에서 PO_4^{3-} 의 연변동은 7~27 $\mu\text{g P/l}$ 범위로 마산 내만보다 변동의 폭이 작았다(Figs. 4D, 4I).

1월과 7월의 PO_4^{3-} 의 변동은 Fig. 6과 같다. 1월에는 수심에 따른 PO_4^{3-} 의 변동 범위는 18~67 $\mu\text{g P/l}$ 였고 조사지점간 변동의 폭은 20~67 $\mu\text{g P/l}$ 였다. 마산 내만으로 갈수록 특히 해수표면의 PO_4^{3-} 농도가 증가하였다. 7월에는 상층의 PO_4^{3-} 농도가 5~32 $\mu\text{g P/l}$ 에 불과했으나 하층에는 37~70 $\mu\text{g P/l}$ 로 상층보다 2~7배 높았다. 1월에는 육상으로부터 오·폐수의 직접적인 영향이 나타나고, 7월에는 퇴적층에서 영양염류의 용출 영향이 나타난 것으로 추정된다.

상층의 규산염 농도는 마산만에서 1~1,016 $\mu\text{g Si/l}$, 진해만에서 3~1,491 $\mu\text{g Si/l}$ 범위였다. 규산염의 농도는 편모조류가 많이 발생하는 6~8월에 대체로 높았다. 마산-진해만의 하층에서

규산염 농도는 18~842 $\mu\text{g Si/l}$ 범위로서 상층보다 변동 폭이 더 작았다(Figs. 4E, 4J). 1월과 7월 규산염의 변동은 Fig. 6과 같다. 1월에는 수심에 따른 규산염의 수직 변동(179~322 $\mu\text{g Si/l}$)보다는 조사지점간 변동의 폭이 훨씬 컸다(11~322 $\mu\text{g Si/l}$). 반면, 7월 규산염 농도는 2~1,491 $\mu\text{g Si/l}$ 범위로서 하층으로 갈수록 증가하여 뚜렷한 성층화를 이루었다. 상층의 규산염 농도는 규조류 생물량의 변동 영향을 크게 받았다. 1997년 1월에는 *Thalassiosira* 속 규조류가 대발생하여 규산염의 농도가 감소하였고, 7월에도 상층에는 일부 규조류와 *Prorocentrum triestinum*이 대발생하였다. 그러나 여름철에 하층에서 규산염의 농도가 크게 증가하는 것으로 볼 때 규산염도 저질 퇴적토의 영향을 받는 것으로 추정된다.

chl-a의 농도

마산만의 식물플랑크톤 생물량은 Yoshida(1973)의 부영양화 기준치인 연평균 10 $\mu\text{g/l}$ 를 초과하여 과영양상태(hypertrophic)로, 진해만 지역은 부영양상태(eutrophic)로 평가되었다. 시기적으로 마산만에서는 4월부터 chl-a 농도가 증가하기 시작하여 9월까지 지속되었으며, 진해만에서는 1996년 6월 및 1997년 7월에 두 번의 대발생이 관찰되었다.

마산-진해만에서 계절과 수심에 따른 변동은 Figs. 3E, 3J와 같다. 조사지점에 따라 연간 식물플랑크톤 대발생의 빈도가 서

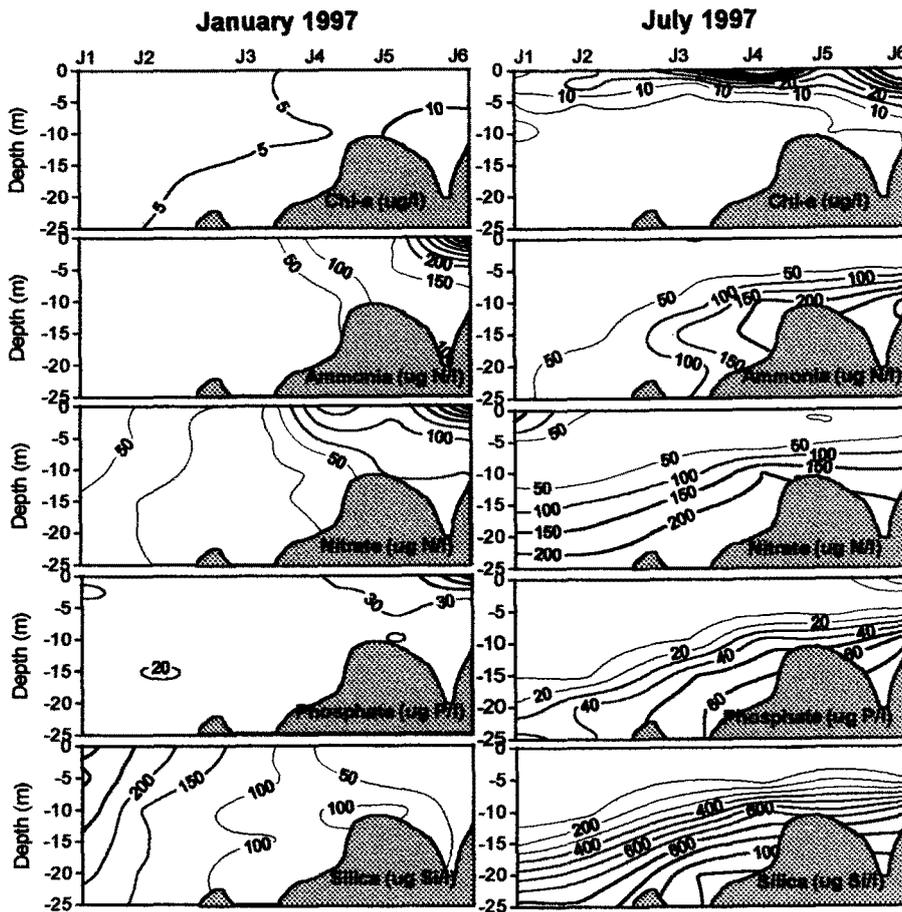


Fig. 6. Station-depth profiles of chl-a, ammonia, nitrate and silica along the sampling stations in the Masan-Jinhae Bay on January 30, 1997 and July 29, 1997.

로 달랐으나, 마산만 내만 쪽으로 갈수록 발생 횟수가 빈번하였다. J1 지점에서는 2년간 2회(1996년 7월, 1997년 7월) 관찰되었으나, J5 지점에서는 6회(1996년 4, 6, 7, 8, 10월, 1997년 6월) 관찰되었다. 대발생하는 조류는 대부분 편모조류와 규조류였는데, 편모조류는 응집된 형태로 나타나거나 조류 띠를 이루었다. 편모조류는 주광성으로서 주간에는 대개 상층에 분포하기 때문에 수표면에서 그 농도가 가장 높게 나타났다. 1996년 7월 *Prorocentrum* 대발생시 상·하층간 chl-a 농도 차이는 0.6~79.0 $\mu\text{g/l}$ 으로 매우 컸고, 조류의 수직 분포가 뚜렷하였다.

1월과 7월에 chl-a 농도의 변동은 Fig. 6과 같다. 겨울에는 수심에 따른 chl-a의 농도가 1.4~14.2 $\mu\text{g/l}$ 였고, 여름에는 1.0~55.3 $\mu\text{g/l}$ 으로 여름의 수직변동 폭이 훨씬 컸다. 조사지점 간에도 마산 내만으로 갈수록 여름과 겨울 모두 높은 값을 나타냈으며, 특히 여름에 각 조사지점별 수심별 chl-a의 농도 구배가 뚜렷하였다.

고 찰

마산-진해만에서 수질 변동을 조사한 결과 계절, 조사 지점간 또는 수심별 변동이 매우 다양하게 나타났다. 여름에는 상·하층 수직 혼합이 미약하여 수심에 따른 구배가 뚜렷하게 형성되어 상·하층에서 수온과 DO의 성층화가 강하게 나타났다. 그러나 겨울에는 상·하층 수직 혼합이 활발하여 수직 구배가 없어

지고 조사지점간 변동이 심하였다. 성층화 정도는 시기에 따라 다르나 대체로 6월부터 8월까지 나타났고, 겨울과 같은 수평분산은 11월부터 이듬해 2월까지 지속되었다. 4월 *Eutreptiella* 속 조류가 대발생하는 시기에 이미 상·하층간 성층화가 일부 나타나기 시작하여 6월부터는 하층에 빈산소 수괴가 형성되었다. 빈산소 수괴가 형성되는 시기에는 하층에 NH_4 와 PO_4 의 농도가 특히 높아졌다. 그러나 NO_3 는 NH_4 농도가 높았던 7~8월을 전후하여 고농도로 나타나기도 하였고, 빈산소 수괴가 나타나는 하층에서는 그 농도가 낮았다. 특히, 고수온기의 빈산소 상태는 무기 인과 질소의 용출을 증가시키는 역할을 하여 수질을 더욱 악화시킨다(국립수산진흥원, 1997). 금번 조사 결과에서 마산-진해만에서 무기 질소와 인은 외부에서 유입되는 오폐수와 저질층의 영향이 가장 큰 것으로 추정된다. 마산만에서 하층의 빈산소 수괴는 70년대부터 관찰된 것으로 보고되었으며(권, 1979), 저질 퇴적층이 PO_4 의 주요 유입원으로 추정되었다(Yang and Hong, 1982). 그러나 1970년대에는 마산 내만보다 행암만-부도 근해의 PO_4 농도가 매우 높게 관찰됨으로써 행암만에서 PO_4 의 확산 영향이 제기되기도 하였다(박, 1975; Yang and Hong, 1982).

마산만의 수질은 겨울에는 육수 유입의 영향을 상대적으로 크게 받고, 성층화가 일어나는 여름에는 육수 유입과 저질 퇴적층의 영향을 동시에 받는 것으로 추정된다. 그러나 저질 퇴적층도 오·폐수나 강우시 유입된 유기물이 퇴적된 것으로서 볼 수

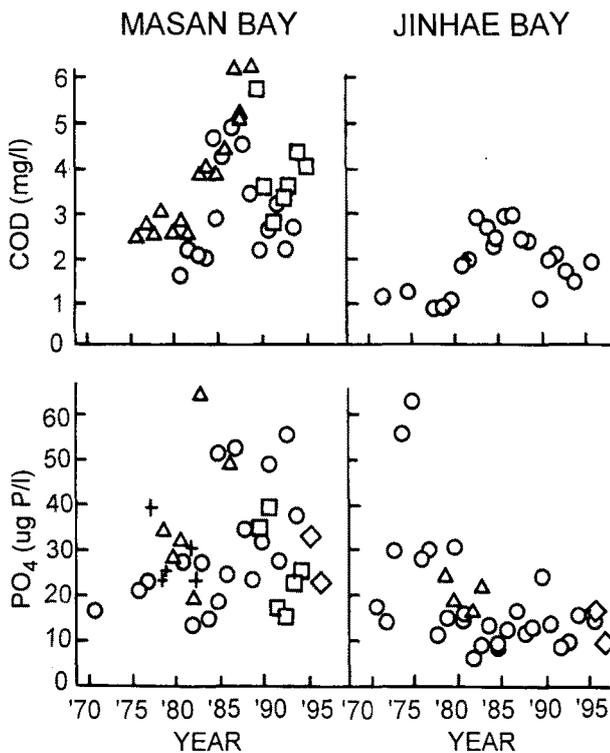


Fig. 7. Trends of annual mean values of phosphate and COD concentration (surface water quality) in Masan and Jinhae bays from 1971 to 1996. ○: 국립수산진흥원, 1972, 1977, 1983, 1987, 1989, 1996, 1997; △: Lee, 1994; ▽: 이, 1987; +: 하, 1985; □: 이와 권, 1994, 마산시, 1996, 한국해양연구소, 1997; ◇: this study.

있기 때문에 저질층에 의한 영양염류의 내부 부하의 원인도 주로 외부 오염원일 것이다. 성층화는 높은 수온을 동반하면서 상층에서 식물플랑크톤의 높은 성장을 가능하게 하지만 하층에서 상층으로의 무기 영양염류 공급을 방해하여 지속적인 성장을 제한 할 수도 있다(배와 유, 1991). 이러한 성층화는 여름이 아니더라도 저염 성층화가 형성될 수 있으며, 수직적 성층화 이외에 지역에 따른 불연속 전선이 형성되기도 한다(한 등, 1991). 단기 변동을 보더라도 마산만의 염분은 강우에 절대적으로 민감하므로 강우는 저염층, 성층화 및 전선형성에 중요한 인자가 되며 수질 환경을 지배하는 주요 요인으로 볼 수 있다.

마산만에서는 4~7월과 10월 경에 식물플랑크톤의 대발생이 일어났고, 진해만에서는 주로 7월 경에 대발생하였다. 식물플랑크톤이 번무하는 시기에는 대체로 상층의 NH₄, NO₃ 및 PO₄ 등 무기 영양염류의 농도는 증가하였다. 이 때 DO는 대체로 증가하였으나 chl-a 증가와 동시에 투명도와 염분은 감소하였다. 염분 감소와 chl-a 증가는 마산만과 진해만에서 모두 관찰되었다. 육수 또는 강우 유입에 따른 내만의 염분 감소가 조류를 번무시키는 요인인 것으로 추정된다. 김 등(1994)은 해수유동 및 생태계 모델을 이용하여 1993년 여름 마산만의 식물플랑크톤의 농도 분포를 재현한 결과, 저질의 용출 부하보다 오·폐수 유입을 가장 중요한 부하원으로 평가하였고 이 등(1997)도 하천이나 강으로부터 유입되는 오·폐수가 주된 원인으로 보고하였다. 1983년 이후 특히 강우량이 많았던 해에 적조 발생량과 빈도가 높았던 점(김, 1989) 등도 이를 뒷받침한다.

금번 조사 결과에서도 마산-진해만은 단기 수질 변동이 크고 식물플랑크톤의 천이와 변동이 컸다. 여름철 단기 변동을 조사한 결과(배와 유, 1991) 또는 야외 실험수조(microcosm) 설치 결과(김 등, 1993)를 보더라도 수질과 식물플랑크톤의 단기 변동이 매우 활발하였고, 수질 환경과 플랑크톤의 발생 양상이 매우 동적임을 보여주고 있다. 수질 요인과 식물플랑크톤의 다상관 분석 결과, pH, 염분, NO₃ 등이 편모조류에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 나타났다(Yoo, 1991). pH는 조류의 광합성이 활발할 때 현저히 증가하는 경향이 있는 점에서 pH가 조류 대발생의 원인으로 작용하기는 어려울 것으로 보인다.

마산만에서 식물플랑크톤의 변동은 70년대 이후 최근까지 다양하게 전개되었다. 80년대 이후 유해편모조류가 증가하고 발생 해역도 광역화하였다. 그동안 마산-진해만 해역에서는 수질 분석 또는 오염도 조사가 활발하게 전개되었다. 마산만과 진해만에서 수질 분석 자료를 수집하고 연 평균값을 구하여 최근 25여 년 동안 수질 변동을 보면 Fig. 7과 같다. 문헌은 국립수산진흥원 자료를 비롯하여 각 기관에서 발간된 보고서와 논문 자료를 이용하였다(국립수산진흥원, 1972, 1977; 해양개발연구소, 1980; 국립수산진흥원, 1983; 하, 1985; 국립수산진흥원, 1987; 이, 1987; 국립수산진흥원, 1989; 이와 권, 1994; Lee, 1994; 마산시, 1996; 국립수산진흥원, 1996; 한국해양연구소, 1997; 남해수산연구소, 1997). 마산만은 돌섬과 부도 사이 지역을, 진해만은 가덕도 동편에서 잠도 사이 동부해역의 자료만을 취하여 지역 간 상호 비교가 가능하도록 하였다. 연중 조사 횟수가 적거나 연 평균값을 산출하기 어려운 자료는 제외시켰다. 기존 자료를 정리해 본 결과, COD와 PO₄ 자료만이 활용 가능하였으며, NH₄와 NO₃는 조사 기관별 편차가 너무 크고 연 평균값을 구하기에 자료가 부족하였다. 과거의 수질 분석은 주로 마산만에 치중되어 있었으며, 진해만 동부 해역의 수질 자료는 국립수산진흥원의 것 이외에는 참고할 만한게 없었다.

연 평균값으로 본 마산-진해만의 수질 변동은 편차나 산포가 컸지만, 1970년 이후 COD와 PO₄의 농도 증가 추세가 뚜렷하였다. 그러나 1990년 경을 고비로 감소하기 시작하였으며, COD의 경우 진해만에서도 그러한 경향성이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 7). 기존 자료를 분석한 결과, NH₄ 농도는 1985년을 경계로 크게 증가하였으며, 총무기질소(total inorganic nitrogen)의 농도도 비슷한 경향성을 나타내었다(Lee, 1994). 마산-창원시의 인구 증가나 공단 조성 등 오·폐수 유입량의 급격한 증가를 반영하는 것으로 추정된다. 마산만의 수질을 개선시키기 위하여 1990년 6월부터 1994년 12월까지 마산시는 총 287억 원의 예산을 들여 마산만으로 유입되는 하천의 하구와 돌섬 내만에서 저질 퇴적토를 준설하였다(이와 권, 1994). 그 동안 마산만 준설에 따른 수질 개선 효과에 대한 논란이 많았으나, Fig. 7의 결과로 보면 준설의 효과가 다소 나타난 것으로 추정된다. 그러나 마산만의 질소와 인의 유입 부하량이 최근들어 증가 추세에 있어, 2001년 마산시 덕동 하수처리장의 2차 처리 시설이 가동될 때까지는 유입량 증가로 수질이 악화될 것으로 예상된다(이 등, 1997).

마산-진해만 주변은 인구 집중 지역이고 오·폐수의 유입 등 육수의 영향을 직접 받는 폐쇄성 내만으로서 외해와 교환이 약

해 오염에 취약하고, 수질 오염도가 높아 식물플랑크톤이 대량 발생할 잠재력이 높은 곳이다. 수질의 공간 및 수직적 변동 양상으로 볼 때, 외부에서 유입되거나 저질에서 생성되는 영양염류의 부하량을 점진적으로 감소시켜 부영양화 요소를 제거시키려는 것이 무엇보다 중요할 것으로 본다.

사 사

본 연구는 1996년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(BSRI-96-4445) 지원에 의하여 수행되었습니다. 2 년간의 진해만 조사시 선박을 제공해 준 진해시 안골동 손원실 선장님과 올림픽 5호를 이용하게 해준 한국해양연구소에 감사 드립니다.

참고문헌

- 강시환, 김창식, 박광순, 1989. 연안환경 보전 기술 개발연구. 한국해양연구소, BSPG 00083-242-4, pp. 163-238.
- 경상남도, 1997. 수산회람. 90 pp.
- 국립수산진흥원, 1972. 연안 어장 환경 조사. 사업보고 제12호, pp. 71-113.
- 국립수산진흥원, 1977. 연안 어장 환경조사. 사업보고 제36호, pp. 77-99.
- 국립수산진흥원, 1983. 한국 연안어장 보전을 위한 환경오염 조사연구. 사업보고 제58호, pp. 286-311.
- 국립수산진흥원, 1987. 한국 연안의 적조발생과 천이에 관한 연구. 사업보고 제69호, 163 pp.
- 국립수산진흥원, 1989. 한국 연안 어장 보전을 위한 환경오염 조사연구. 사업보고 제84호, pp. 142-307.
- 국립수산진흥원, 1996. 한국연안 어장 환경오염 조사 결과 보고서(1989-94). 225 pp.
- 국립수산진흥원, 1997. 한국연안의 적조: 최근 적조의 발생원인과 대책. 280 pp.
- 권선원, 1979. 하계 진해만 해역의 용존산소 분포에 관하여. 국립수산진흥원 연구보고, 22: 7-20.
- 김종규, 박청길, 김광수, 1994. 하계 마산만의 부영양화 제어를 위한 생태계 모델의 적용. 한국환경과학회지, 3: 185-195.
- 김학균, 1989. 마산만의 편모조 적조의 발생과 환경특성. 국립수산진흥원 연구보고, 43: 1-40.
- 김학균, 박주석, 이삼근, 안경호, 이필용, 1993. 마산만에 설치한 야외수조내의 식물성플랑크톤의 천이와 환경변화. 국립수산진흥원 연구보고, 47: 9-18.
- 남해수산연구소, 1997. 사업보고서. 561 pp.
- 마산시, 1996. 마산만 해양 환경 종합 모니터링. 경남대학교 환경문제연구소, 136 pp.
- 박주석, 1982. 진해만 적조의 특성과 환경변화. 국립수산진흥원 연구보고, 28: 55-88.
- 박주석, 김중두, 1967. 진해만의 적조현상에 관한 연구. 국립수산진흥원 연구보고, 1: 65-79.
- 박주석, 김학균, 이삼근, 1982. 진해만의 적조현상과 원인생물의 천이. 국립수산진흥원 연구보고, 41: 1-26.
- 배세진, 유신재, 1991. 마산만 식물플랑크톤의 단기적 변화양상: 1. 동태. 한국해양학회지, 26: 67-76.
- 유광일, 이종화, 1976. 마산만의 환경학적 연구. 2. 식물성 플랑크톤의 연변화. 한국해양학회지, 11: 34-38.
- 이준백, 1987. 마산만 일대 쌍편모조류 군집의 구조와 동태에 관한 연구. 박사학위논문, 한양대학교, 서울, 133 pp.
- 이진환, 한명수, 허택형, 1981. 진해만의 적조원인생물에 관한 연구. 한국해양연구소 소보, 3: 97-105.
- 이찬원, 권영택, 1994. 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링. 경남대학교 환경문제연구소, 264 pp.
- 이찬원, 권영택, 양기섭, 장풍국, 김봉진, 한성대, 1997. 폐쇄성 해역의 오염부하 특성과 해역 환경변화. 1997년도 한국해양환경공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 281-290.
- 하영철, 1985. 1976-1982년 진해만 해양 기초조사 최종보고서. 서울대학교 자연과학대학 미생물학과, 258 pp.
- 해양개발연구소, 1980. 진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템 개발을 위한 기초 연구. BSPE 00022-43-7, 459 pp.
- 한국해양연구소, 1982. 진해만의 적조 및 오염 모니터링 시스템 개발을 위한 연구. BSPE 00044-66-7, 166 pp.
- 한국해양연구소, 1997. 연안환경 개선기술. 해양오염 방제 및 환경회복 기술 사업의 제2단계 제1차년도 보고서. 환경부·과학기술처, BSPN 00307-949-2, 265 pp.
- 한명수, 김세화, 김영옥, 1991. 마산만에서 관찰된 불연속층과 플랑크톤 군집 구조와의 관계. 한국수산학회지, 24: 459-471.
- 환경처, 1991. 진해만 일원 오염실태 조사보고서. 경남대학교 환경문제연구소, 457 pp.
- 환경부, 1996. 환경통계연감. 646 pp.
- Lee, J.H., 1994. Environmental factors affecting red-tide blooms in Jinhae Bay, Korea. In: Proceedings of 2nd Korean-Japan Joint Seminar, Seoul National University (Seoul), October 24-25, pp. 361-402.
- Park, C.K., 1975. Study on the characteristic distribution of phosphorus in Jinhae Bay. *J. Korean Fish. Soc.*, 8: 68-72.
- Strickland, J.D. and T.R. Parsons, 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin of Fisheries Research Board of Canada, No. 167, 310 pp.
- Yang, D.B. and G.H. Hong, 1982. Nutrients and chlorophyll-a variations at a fixed station during the red tides in the Jinhae Bay. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 17: 19-26.
- 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.
- Yoo, K.I. and J.H. Lee, 1979. Environmental studies of the Jinhae Bay 1. Annual cycle of phytoplankton population, 1976-1978. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 14: 26-31.
- Yoo, K.I. and J.H. Lee, 1980a. Environmental studies of the Jinhae Bay 2. Environmental parameters in relation to phytoplankton population dynamics. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 15: 62-65.
- Yoo, K.I. and J.H. Lee, 1980b. Environmental studies of the Jinhae Bay 3. Ecological succession of phytoplankton population, 1974-1980. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 15: 100-107.
- Yoshida, Y., 1973. Changes in biological production in low trophic levels. In: Fisheries Series, 1, Koseisha Koseikaku, Tokyo, pp. 92-103.

1998년 5월 18일 원고 접수
1998년 9월 3일 수정본 채택