

마산만 주변 해역에서 오염인자와 해양환경변동과의 관계

신소영* · 이충일** · 황선출*** · 조규대***

* 부경대학교 교육대학원 지구과학 전공, ** 부경대학교 해양산업개발연구소, *** 부경대학교 해양학과

Relationship between Pollution Factors and Environmental Variation in Waters around Masan Bay

So-Young Shin* · Chung Il Lee** · Sun Chool Hwang*** · Kyu Dae Cho***

* Science Education, Graduate School of Education, Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea
** Research Center for Ocean Industrial and Development, Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea
*** Dept. of Oceanography, Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea

요약 : 1981년부터 1998년까지 연구해역에서 COD와 DIP의 2월, 4월, 8월, 11월의 월별 분포양상은 비슷하였고, 두 항목 모두 8월에 가장 높은 값을 보인 반면 DIN의 경우는 2월, 4월, 8월, 11월로 갈수록 점차 증가하는 경향을 보였다. COD값은 1990년부터 1992년까지 점차 증가하다가 1993년, 1994년으로 갈수록 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 마산만의 준설기간 중반부터 준설의 효과가 표층까지 나타난 것으로 보여진다. DIN과 DIP의 표층 농도 변화에는 준설의 효과가 뚜렷이 나타나지 않았다. COD의 공간적인 변동에서 적조가 빈발하였던 연도가 그렇지 않았던 연도에 비해 높은 COD농도의 분포가 마산만 밖으로 확장되어 있었고, 준설에 의한 COD값의 뚜렷한 변동은 나타나지 않았다. 전체적으로 DIN농도의 공간적인 분포 양상을 살펴보면 마산만의 안쪽에서부터 바깥쪽으로 오염이 점차 확장되었다. 마산만의 가장 안쪽 지점이 일정한 경향이 없이 높은 DIN농도를 유지하였으며, 내만 유역에 마산만의 오염원이 집중되어 있고, 마산만 유역에서 생활하수 및 산업폐수가 계속적으로 유입되고 있었다. DIP농도의 공간적인 분포에서도 마산만 준설이 DIP의 표층 농도 변화에는 뚜렷한 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 강수량과 COD, DIN, DIP 농도 사이에는 일정한 상관성이 없었으며, 적조발생일수와 COD 농도 사이에는 0.66의 대체로 높은 상관성을 나타내었다.

핵심용어 : 마산만, 오염인자, 해저준설, COD, DIN, DIP

Abstract : This study focuses on the relationship between pollution factors around Masan, Changwon and Chinhae city considered as main pollution sources and marine environment in Masan bay of Korea. Water quality data measured in Jinhae bay and environmental investigation data in Masan, Changwon and Jinhae cities from 1981 to 1998 were used for this study. Annual means and standard deviations of COD, DIN and DIP concentrations from 1981 to 1998 showed that both their concentration and fluctuations were higher in the inner part of Masan bay (region A) than near Somodo (region B). Sediment dredging in Masan bay had been done from 1990 to 1994. After dredging, COD concentration has been decreasing in surface layer. Also water pollution was gradually spreaded from the inner part to the outer part of the bay due to the continuous inflow of domestic sewage and industrial wastewater. In the late of 1990s, the pollution was heavier. DIN and DIP concentrations were found to be increased by establishment of industry complex and decreased by sewage treatment plant near the city adjacent to Jinhae bay, 1993. The correlation between COD, DIN and DIP changes and neighbor cities' pollution sources were calculated. From 1981 to 1998, correlation coefficient (r) was over 0.8 except for the bottom of region A. From 1981 to 1998, r between the DIP concentration and population was over 0.65 except for the surface of region A, and the r between the DIP and the number of factories was over 0.6 too, in region B.

Key words : Masan bay, Pollution factors, Sediment dredging, COD, DIN, DIP

1. 서 론

한국 남해안의 동쪽에 위치하고 있는 마산만 주변 해역은

진해시, 마산시, 창원시, 거제시, 통영시, 고성군으로 둘러싸인 대표적인 반폐쇄적인 내만이다. 진해만은 남북 방향의 길이가 총 25km, 동서 방향의 폭이 총 25km 정도의 크기로 평균수심이 약 10m인 천해의 내만으로 내부해역은 6개의 소규모만으로 이루어져 있다. 주변 육상에서 유입되는 하천의 수는 대략 40여개 이며, 이들 중에서 마산만으로 유입되는 오염부하가 가장 큰 특징을 가진다(환경부, 1991). 그리고 연구해역은

* hayanas@hanmail.net 051)620-6211
** 대표저자 : 정희원, leeci@mail1.pknu.ac.kr, 051)620-6211
*** schwang@kotric.or.kr 051)620-6211
**** 정희원, kdcho@pknu.ac.kr 051)620-6211

해조류(海藻類)와 패류(貝類)의 생산량이 많은 우리나라의 중요 패류 어장 중의 하나이다. 1970년에 설립된 마산수출자유지역을 비롯하여 1974년 창원 기계공업단지의 설립, 1982년 진해 산업기지 설립, 그리고 1992년에는 진해 마천주물공단이 설립되어 진해만 주변 도시는 새로운 임해공업단지를 형성하게 되었다. 그로 인하여 인근 도시인 마산, 창원, 진해 등의 도시 인구가 증가하면서 각종 생활하수와 공업폐수의 배출량이 점차 많아지게 되었다. 그 결과 오염수가 정화되지 않은 채로 유입되어 반폐쇄적인 진해만은 외해와의 해수교환이 어려운 지형이므로 수질의 악화가 가중되어 왔다.

한국의 남해와 서해안은 동해에 비해 특히 수질 오염에 민감한데, 이것은 비교적 얕은 수심과 만의 일부만 외해와 연결되어 있는 반 폐쇄성 지형 조건으로 해수 교환이 적음으로 인해 해수의 체류시간이 길어져, 작은 오염물의 유입에도 쉽게 오염이 되고, 오랜 기간동안 오염상태가 지속되는 것이다 (Lee, 1980).

마산시는 마산만 정화사업의 일환으로 1990년 6월부터 1994년 12월까지 4년에 걸쳐 저질 퇴적물 211만톤을 준설하여 제거하였다(조 등, 1998; 이, 1994). 또한 창원시에 1992년 11월에 분뇨처리장이 설치되었고, 마산시에는 1993년 5월에 하수처리장이 설치되었으며 11월부터 가동되기 시작하였다(이 등, 1998). 이(1994)는 마산만 준설사업으로 인한 인근 해역으로의 오염물질 증가 현상은 관찰되지 않았고, 준설기간 동안 COD, DIN, $PO_4^{3-}P$, TSS는 그 농도의 감소를 보여 준설로 인한 해수의 수질이 개선되었다고 생각되나, TIN만을 주목하여 보면 그 농도의 개선은 이루어지지 않았다. 이와 권(1994)도 준설기간동안 COD와 $PO_4^{3-}P$ 농도가 다소 감소하였고 투명도가 높아지는 등 수질 개선효과가 나타났으나, 질소농도는 뚜렷한 변동이 없었다고 하였다.

한편 魏(1994)는 하수종말처리장의 해양방류에 따른 마산만의 환경 특성 변화를 관찰한 결과, 육계 부근의 방류 해역이 인근 해역보다 COD, TSS, TIN, $PO_4^{3-}P$ 의 농도가 높게 나타났음을 보고하였다. 또한, 마산-진해만은 질소와 인 등 영양염의 과잉 유입으로 부영양화되어 적조가 빈발하는 해역으로 알려져 있고, 지금까지 적조에 관련된 많은 연구가 수행되어 왔다(朴과 金, 1967; 유와 이 1976; 박, 1982; 김, 1989; 유와 이, 1985, 1990; 문, 1995; 이와 백 1998; Yoo and Lee, 1979, 1980; Lee et al., 1981). 그러나 진해만 해역의 오염 현황을 주변 육상 환경의 오염유발 인자와 같은 여건 변화와 관련지어 그 상관성을 규명하고자 한 연구는 부족하다.

특히 수질분석 항목중 COD (chemical oxygen demand)는 해수중에 용존되어 있는 유기물질, 아질산염, 제1철염, 황화물 등 산화성 오염물질을 강력산화제 ($KMnO_4$)로 전부 산화시킬 때 소비되는 산소량을 측정 한 값으로 일반적으로 해수중에 있는 화학물질, 유기물 등의 환원성물질의 양을 표시한다. DIN (dissolved inorganic nitrogen)은 해수중에 용존되어 있는 무기태 아질산염 (NO_2^-N), 질산염 (NO_3^-N) 및 암모니아태

질소량 (NH_4-N)의 합계를 말한다. DIP (dissolved inorganic phosphate)량은 해수중에 용존되어 있는 인산염 ($PO_4^{3-}P$)의 양이다. DIN과 DIP의 용존량은 해수의 영양상태를 나타내며 해수중에 있는 1차 생산자의 증식량에 절대적으로 영향을 미친다(조 등, 1994).

따라서, 이 연구에서는 마산만 주변해역의 주요오염원으로 예상되는 마산, 창원, 진해시 등의 육상환경변화와 1981년부터 1998년까지 진해만의 오염 상황을 파악하였다. 그리고 진해만 주변 도시의 육상 오염유발 인자와 해양환경과의 관계를 분석함으로써 각각의 오염 유발 인자들이 진해만의 환경 변화와 어떠한 관련성을 가지는지를 규명하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 수질조사 자료

진해만에서 마산만 부근 해역의 수질 특성을 나타내는 항목으로 수온, 염분, 용존산소량 (DO), 화학적산소요구량 (COD), 용존무기질소 (DIN), 용존무기인 (DIP)의 1981년부터 1998년까지의 연변동 자료를 이용하였다. 이 자료는 국립수산진흥원의 연구보고자료(1996), 사업보고서(1987, 1996), 조사연보(1995-1998)에서, 1981년부터 1995년까지의 연평균 수질 특성은 2월, 4월, 8월, 11월 년 4회 관측한 것의 평균값을 사용하였고, 1996년은 2월, 5월, 9월, 11월 관측치의 평균값, 1997년과 1998년은 2월, 5월, 8월, 11월 관측치의 평균값을 사용하였다.

2.2 환경조사 자료

연구해역의 주 오염원으로 예상되는 마산시, 창원시, 진해시의 영향을 직접받는 마산만 부근 해역을 주 연구대상 해역으로 설정하였다(Fig. 1). 그리고 육상 오염원과 관련되는 마산시, 창원시, 진해시의 1981년부터 1998년까지 연도별 인구변동 현황, 공장등록현황(광공업 및 상업에서 섬유화학기타)을 조사하였고, 마산시의 연평균 강수량, 그리고 마산만과 행암만 해역에서의 적조발생일수도 진해만 오염과의 관련성을 파악하기 위해 조사하였다(마산시, 창원시, 진해시, 1982-1999; 기상청, 1991-1998; 국립수산진흥원, 1997). 마산시의 연도별 질소질인산질 비료공급 현황과 마산과 창원시의 가축사육 현황도 마산만의 부영양화와 관련성을 가지는지 파악하기 위해 조사하였다(마산시, 창원시, 1987-1998).

2.2 자료분석 방법

마산만의 안쪽 지점(region A, Fig. 1)과 소모도 부근(region B, Fig. 1), 두 지점을 선정하여 수질조사 항목인 수온, 염분, DO, COD, DIN, DIP의 1981년부터 1998년까지 표저층 연변동 양상과 진해만 주변 도시인 마산, 창원, 진해시의 환경변동 양상을 분석하였다. 다음에 마산만 부근의 오염 진

행 정도를 살펴보기 위해 오염의 정도를 나타내는 인자인 COD, DIN, DIP 농도의 시공간적인 분포를 나타내었다. 그리고, 수질 특성을 나타내는 인자들과 진해만 주변의 환경변동을 나타내는 인자들간에 선행적인 관련성이 있는지 알아보기 위해 상관분석을 실시하였다. 특히 COD, DIN, DIP와 환경변동 인자들간의 관계를 중심으로 살펴보아 마산만 부근의 오염과 주변환경 변동과의 관련성을 파악하고자 하였다. 마산만 준설이 행해졌던 시기와 마산시 하수처리장이 설립되었던 시기를 전후로 1981년부터 1998년까지 오염의 진행 양상과 추이를 분석하였다.

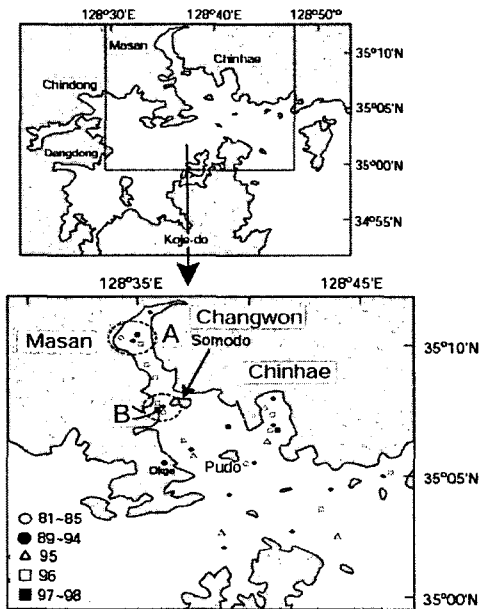


Fig. 1. Map showing the sampling station in Jinhae bay, 1981-1998

또한 마산만에서 환경변동이 심했을 것으로 예상되는 마산만 준설이 행해졌던 1990년 7월부터 1994년 12월까지의 시기와 마산시 하수처리장이 설치되어 가동되기 시작한 (1993년 11월) 시기를 전후로 1981년부터 1998년까지 오염의 진행 양상과 추이를 분석하였다.

3. 결 과

1. 오염인자 및 해황의 변동

1) 주변 도시의 환경 변동

마산, 창원, 진해시의 인구는 점차 증가하는 추세를 보였는데 1981년 642,620명에서 1998년에는 1,075,787명으로 1981년에 비해 약 1.7배 정도 증가하였다. 1981년부터 1990년까지는 꾸준히 증가하다가 1991년에 895,041명으로 전년도에 비해 44,000명 정도 감소하였고, 1995년 이후에는 100만명을 초과하였다(Fig. 2). 마산, 창원, 진해시의 공장등록현황도 Fig. 2에서 보는 것처럼 대체로 증가하는 경향을 보였으

며, 특히 1987년부터 1989년까지와 1994년에 공장수의 급격한 증가가 나타났으며, 1988년에는 전년도의 약 1.5배의 증가율이 나타났다.

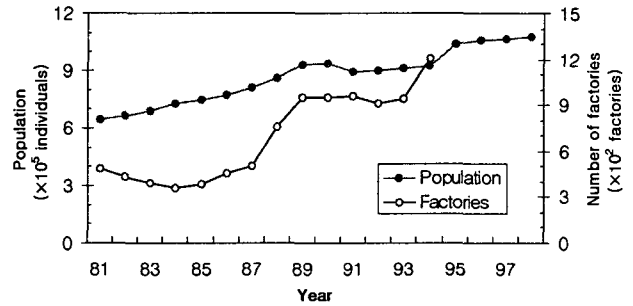


Fig. 2. Variations of population and number of factories in Masan, Changwon and Jinhae cities from 1981 to 1998.

2. 표층 및 저층의 해양환경인자 변동

1) COD

Figs. 3, 4 and 5는 1981년부터 1998년까지 A와 B 지역의 표-저층에서 COD, DIN, DIP의 농도 변화와 각 지역에서 표-저층 농도의 평균값을 나타낸 것이다.

COD 농도는 A 지역에서 표층 1.92 (93년)-3.55mg/l (86년)의 범위를 보였으며(Fig. 3), 수질은 COD를 기준으로 보았을 때 표층의 경우는 1989년 이전에는 3등급에도 미치지 못하는 것으로 나타났고, 저층의 경우는 3등급 (4mg/l 이하) 정도의 수질을 나타내었다. Fig. 3(c)에서 나타난 것처럼 1985년부터 1987년까지 A, B지역 모두 표-저층 평균 COD의 농도가 높게 나타났다.

B지역에서 COD의 농도는 표층 1.91 (93년)-4.14mg/l (87년), 저층 1.55 (81년)-3.17mg/l (85년)의 분포를 보였으며, COD를 기준으로 보았을 때 수질은 표층의 경우 3 등급 정도로 나타났다. 그리고 A 지역에서처럼 1985년부터 1987년까지 평균 COD의 농도가 높게 나타났다. 또한, Fig. 3에서 보는 것처럼 표층과 표-저층 평균 COD의 연도별 분포 양상은 A, B 두 지역에서 비슷한 경향을 보이고 있다.

2) DIN

A지역에서 표층 DIN의 농도는 31.72 (81년)-166.92μg-at/l (91년)범위로 연도별 변동이 크게 나타났다(Fig. 4). 이것은 마산만의 내부인 A 지역이 육상 오염원으로부터 가까이에 있기 때문에, 주변 도시의 육상 환경 변화에 크게 영향을 받는 것으로 여겨진다. B지역에서 표층 DIN의 농도는 15.91 (81년)-86.62μg-at/l (93년)로 A지역에 비해서는 농도가 낮았고, Table 1에 나타난 것처럼 표준편차도 작게 나타났다. 이것은 소모도 부근의 B 지역이 안쪽에 있는 A 지역보다는 해수의 유동이 원활하고, A 지역에 비해서는 육상 오염원으로부터 멀리 떨어져 있기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 표층

의 DIN농도는 A와 B 지역의 농도분포 양상이 거의 비슷하였다.

Table 1. Standard deviation of temperature, salinity, DO, COD, DIN and DIP in Region A and B from 1931 to 1998.

Factors	Temp.	Sal.	DO	COD	DIN	DIP
Region						
surface-A	1.294	1.940	1.605	1.016	35.000	1.432
bottom-A	1.015	0.851	0.619	0.526	21.821	0.541
surface-B	1.171	1.166	1.316	0.606	17.381	0.618
bottom-B	1.040	0.496	0.698	0.515	14.510	0.439

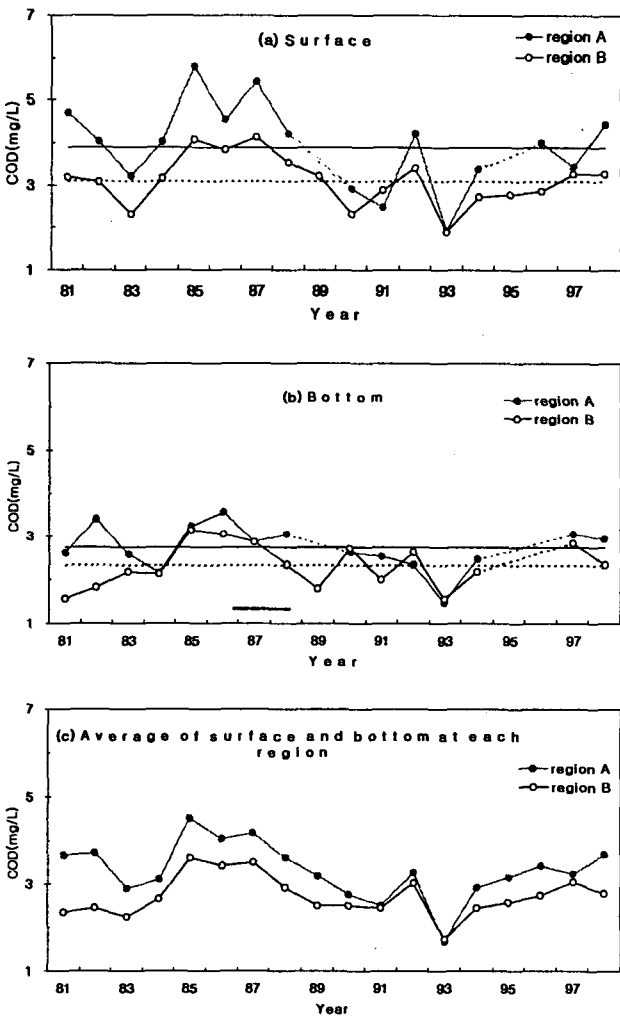


Fig. 3. Variations of COD at region A and B from 1981 to 1998. (-: average of region A, ... : average of region B)

저층의 경우 DIN 농도는 A지역에서는 20.39 (81년)-92.81 $\mu\text{g-at/l}$ (84년), B 지역에서는 11.31 (81년)-66.77 $\mu\text{g-at/l}$ (93년) 범위를 보였으며, 오염물의 직접적인 유

입이 있는 표층보다는 농도나 표준편차가 작게 나타났다. 그리고 1993년 이후 1996까지는 표저층 DIN의 농도가 1990년 이전의 농도에 비해서 낮은 경향을 보였다.

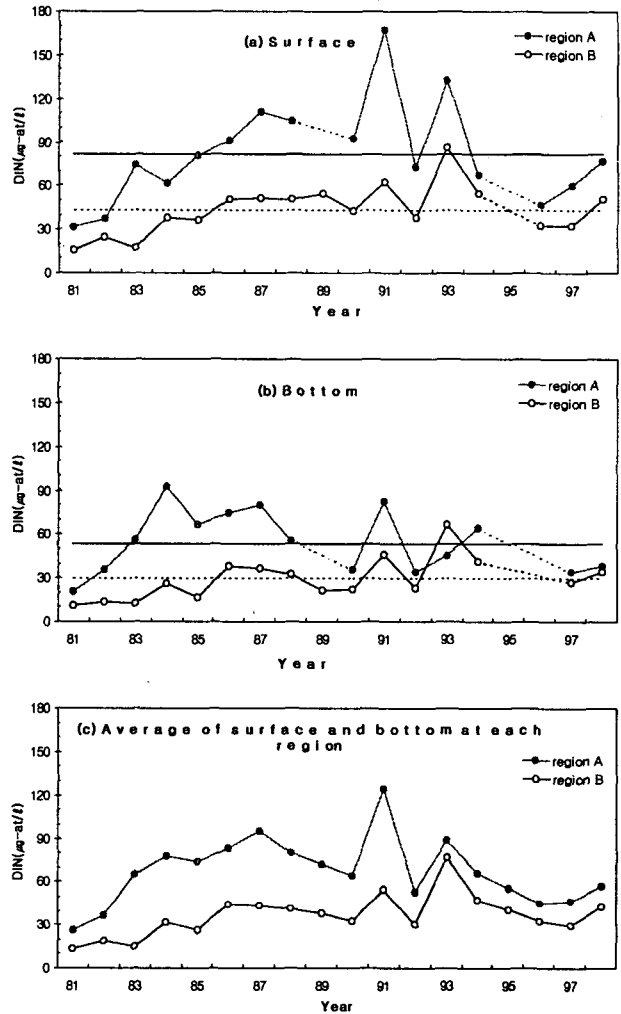


Fig. 4. Variations of DIN at region A and B from 1981 to 1998.(-:average of region A, ...:average of region B)

이것은 1993년 11월부터 마산시의 하수 처리장이 가동됨으로 인해 연간 하수처리량이 1993년 1,798천톤, 1994년 46,637천톤, 1995년 65,268천톤으로 증가(1998, 마산시)해 마산만으로 방류되는 하수량의 감소와 마산만의 준설로 인해 저층에 퇴적되어 있던 오염물질들이 제거된 것이 하나의 원인으로 보인다.

3) DIP

Fig. 5에서 보면 표층에서 DIP의 농도는 A지역에서는 1.04 (82년)-6.37 $\mu\text{g-at/l}$ (87년)로 연도별 변동이 크게 나타났으며, B 지역에서는 0.32 (84년)-2.86 $\mu\text{g-at/l}$ (98년)로 A 지역에 비해서는 농도와 표준편차가 적게 나타났다(Table 1). 저층의 경우 DIP 농도는 A지역에서 0.94 (82년)-2.85 $\mu\text{g-at/l}$

(87년), B지역에서 0.71 (85년)~2.15 $\mu\text{g-at/l}$ (97년)의 범위로, A 지역의 농도가 전반적으로 높게 나타났다(Fig. 5). DIP의 농도 변화도 DIN과 같이 마산만의 안쪽인 A지역이 육상 오염원으로부터 가까이에 있기 때문에, 주변 도시의 육상 환경 변화에 큰 영향을 받아 B 지역에 비해 높은 농도를 보이는 것으로 생각된다.

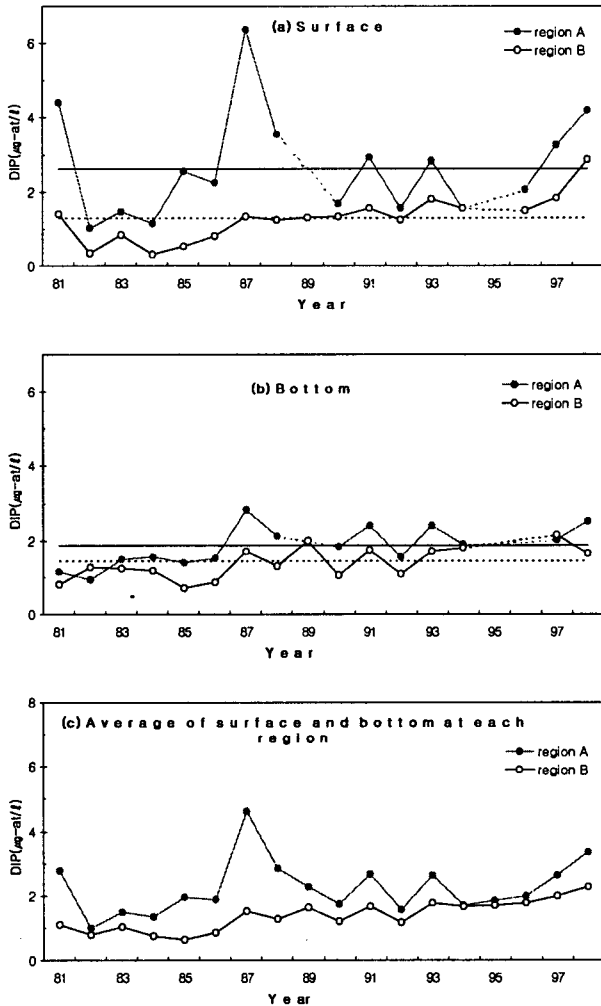


Fig. 5. Variations of DIP at region A and B from 1981 to 1998. (—: average of region A, ---: average of region B)

Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 것처럼 해역의 부영양화 정도를 나타내는 항목인 DIN과 DIP는 연변동 양상이 비슷하였고 1987년과 1991년, 1993년에는 높은 값이 나타났다. DIN과 DIP는 1987년에서 1990년까지는 감소하는 경향을 나타내다가 마산만 준설이 행해진 1990년부터 1994년까지의 시기에 표·저층 모두 농도의 변화가 크게 나타났다.

3. COD, DIN, DIP의 시·공간적 분포

1) 표층

Fig. 6에서 COD의 시·공간적인 분포를 살펴보면 연구해역의 수질은 COD 농도를 기준으로 보았을 때 환경기준 3등급 (COD 4mg/l 이하)이거나 그 이하라는 것을 알 수 있었다. 그리고 COD의 공간적인 변동에서 마산만 준설의 효과가 나타났는지 알아보기 위해 준설전인 1989년, 준설이 진행중인 1991년, 준설이 끝나는 해인 1994년의 COD 농도의 분포 양상을 비교해 보았다.

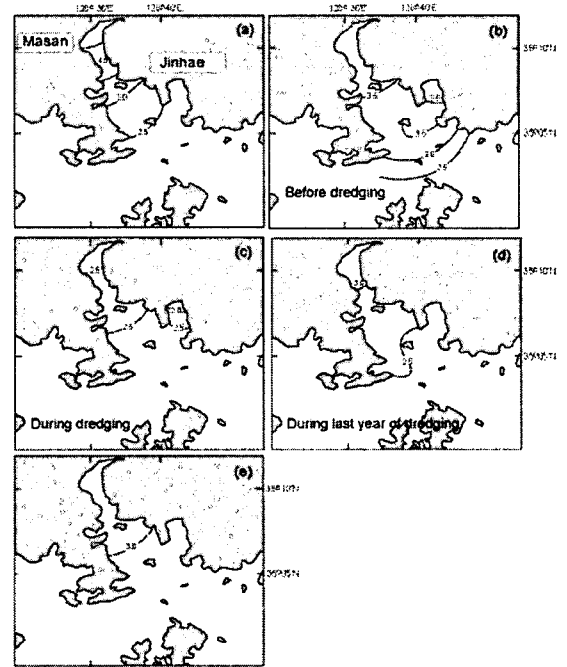


Fig. 6. Horizontal distribution of COD ($\mu\text{g/l}$) in the surface of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

준설이 시작되기 전인 1989년과 준설이 진행되고 있던 해인 1991년에 COD의 농도가 2.54mg/l 되는 등치선을 비교해 보면 1989년의 경우는 2.54mg/l 등치선이 진해만 입구까지 확장해 있는 반면, 1991년의 경우는 2.54mg/l 등치선이 소모도와 부도 사이에 있는 것을 볼 수 있었다. 준설전인 1989년과 준설이 끝나는 해인 1994년의 마산만 부근 COD의 농도 분포양상을 비교해 본 결과, 준설이 끝나던 해의 COD 값이 더 낮게 나타났다. 이것으로 저층 퇴적물의 준설 작업으로 인해 표층으로 용출되는 오염물의 양의 감소가 표층 COD 농도의 감소에 다소 영향을 미친 것으로 생각된다.

Fig. 7에서 DIN 농도의 시·공간적인 분포를 보면 1981년에는 DIN 농도가 30 $\mu\text{g-at/l}$ 되는 등치선이 마산만 안쪽에 있었는데, 1989년, 1991년과 1994년의 분포를 보면 소모도와 부도 사이에 있는 것을 볼 수 있다. 전체적으로 DIN 농도의 공간적인 분포 양상을 살펴보면 마산만의 안쪽에서부터 바깥쪽으로 오염이 점차 확산되었다는 것을 알 수 있다.

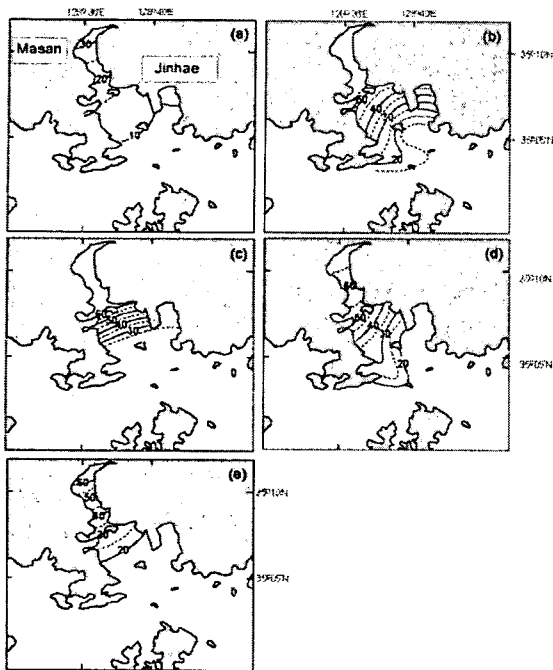


Fig. 7. Horizontal distribution of DIN ($\mu\text{g-at/l}$) in the surface of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

그리고 준설 전후로 DIN 농도의 공간적 분포 양상이 뚜렷한 차이 없이 비슷한 경향을 나타내는 것으로 보아 마산만의 준설이 표층 DIN 농도의 증감에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 이것은 DIN이 용해성 물질이기 때문에 퇴적물의 준설이 DIN의 농도 감소에 큰 영향을 미치지 않는다는 이 (1994)의 결과와 일치한다. 또한 마산만의 내부 해역이 일정한 경향이 없이 높은 DIN 농도를 유지하고 있는 것을 보았을 때, 내만 유역에 마산만의 오염원이 집중되고 있고, 마산만 유역에서 생활하수 및 산업폐수가 계속적으로 유입되고 있다는 것을 알 수 있었다(이, 1994).

Fig. 8에서 1981년부터 1998년까지 DIP 농도의 공간적인 분포를 보면 마산만은 거의 매년 환경기준 3등급 ($0.968\mu\text{g-at/l T-P}$)를 초과하는 수질이 악화된 상태이고, 진해만 전체는 전반적으로 2등급 정도의 수준이었다. 마산만 준설이 DIP의 표층 농도 변화에 영향을 미쳤는지 알아보기 위해 준설 전인 1989년과 준설이 끝나는 해인 1994년의 마산만 표층 DIP 농도의 공간적인 분포를 비교해 보면 마산만의 가장 안쪽 부분을 제외하고는 전반적으로 1989년에 비해 1994년의 DIP 농도가 더 높게 나타났다. 이것으로 보아 준설의 효과가 지났다고는 생각하기 어려울 것 같다.

DIP 농도의 공간적인 분포에서 1991년과 1994년을 비교해 보았을 때, 1991년의 경우는 DIP 농도가 $1.5\mu\text{g-at/l}$ 되는 등치선이 마산만 입구까지 확장되어 있는 반면 1994년에는 같은 농도의 등치선이 소모도 근처에 있어 오염이 완화된 것을 볼 수 있다. 이것으로 미루어 보아 1992년에 창원에 분뇨처리장이 설치되고, 1993년에 마산시에 하수처리장이 설치되

어 마산만으로 배출되는 하수중의 오염물질 감소가 하나의 원인인 것으로 생각된다. 그러나 1998년의 공간적인 분포에서 마산만의 내부 해역의 DIP의 농도가 더 높아진 것을 볼 때 주변 육상으로부터 오염물의 지속적인 유입이 있는 것으로 보여진다.

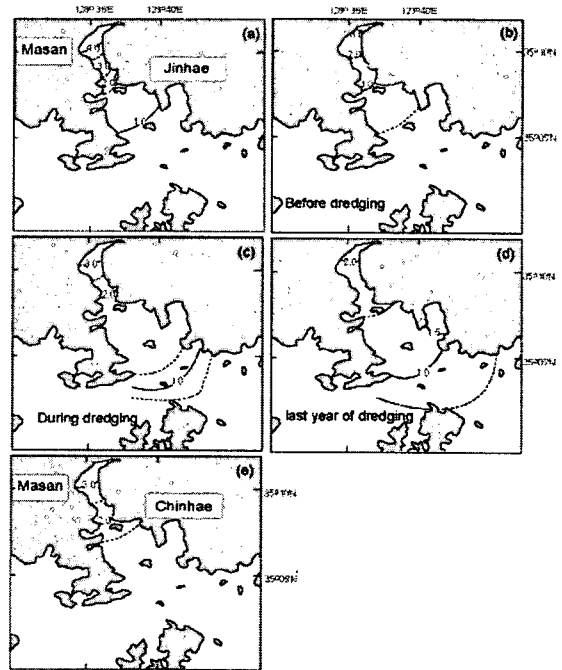


Fig. 8. Horizontal distribution of DIP ($\mu\text{g-at/l}$) in the surface of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

2) 저층

1981년부터 1998년까지 저층 오염물질의 시-공간적인 분포를 통해 마산만의 준설에 의한 효과가 나타났는지를 파악하고자 하였다.

Fig. 9에서 저층 COD의 공간적인 분포는 표층에 비해 농도가 낮았으나, 마산만의 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 농도가 낮아지는 양상은 비슷하였다. 그리고 준설 전인 1989년, 준설이 진행중인 1991년, 준설이 끝나는 해인 1994년의 COD의 농도의 분포 양상을 비교해본 결과, 준설 후에 COD의 농도가 더 높게 나타났다. 이것으로 보아 마산만에서 준설작업이 저층 COD 농도의 감소에는 기여하지 않는 것으로 보인다.

Fig. 10에서 저층 DIN의 공간적인 분포를 보면, 1989년에는 DIN 농도가 $30\mu\text{g-at/l}$ 되는 등치선이 소모도 안쪽의 마산만 내부에 있었는데, 1991년엔 소모도와 부도 사이에 그리고 1994년에는 소모도 부근에 있는 것을 볼 수 있다. 저층의 공간적인 농도 분포는 전체적으로 표층에 비해 낮게 나타났다. 그리고 저층 퇴적물의 준설 작업이 이루어진 후가 준설 작업 전보다 DIN의 농도가 높게 나타났다. 따라서 표층과 같이 마산만에서 준설이 저층 DIN 농도의 증감에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 그리고 1981년과 1998년의 DIN의

공간적인 분포양상을 비교해 보면, 표저층 모두 1998년이 1981년에 비해 진해만 전 해역에서 농도가 전반적으로 높게 나타나는 것을 알 수 있고, 진해만의 오염이 점차 가중되어 왔다는 것을 알 수 있다.

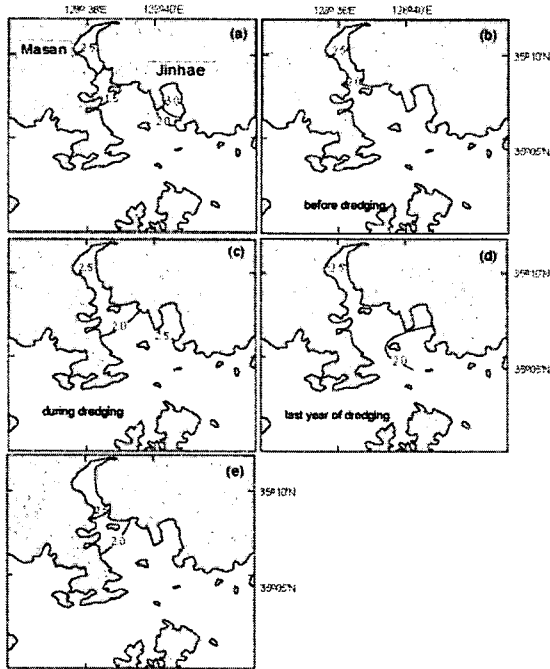


Fig. 9. Horizontal distribution of COD (mg/l) in the bottom of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

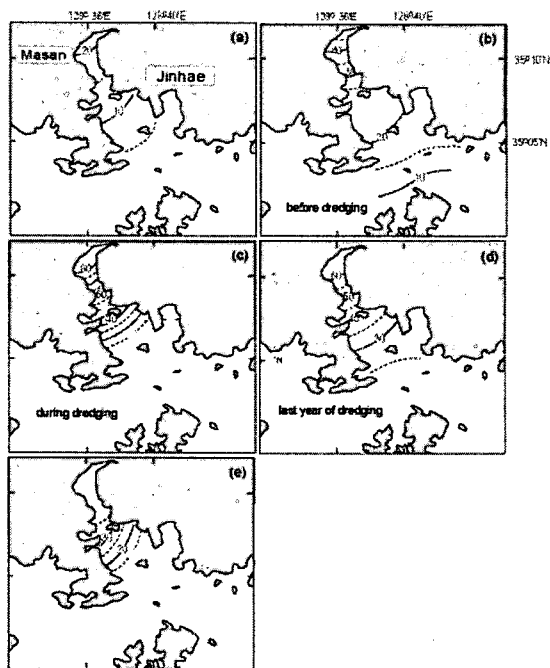


Fig. 10. Horizontal distribution of DIN ($\mu\text{g-at/l}$) in the bottom of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

Fig. 11에서 보면 1981년부터 1998년까지 저층 DIP의 공간적인 분포는 전반적으로 표층에 비해 낮은 농도를 보였으며, 마산만의 내부 해역으로 갈수록 높은 농도가 나타났다. 준설전인 1989년과 준설이 끝나는 해인 1994년의 마산만 저층 DIP 농도의 공간적인 분포를 비교해 보면, 마산만의 안쪽 부분에서는 DIP 농도의 감소가 나타났다. EK라서 저층 퇴적물의 준설이 저층 DIP 농도의 감소에 다소 영향을 미친 것으로 생각된다. 그러나 1998년의 분포 양상을 보면 DIP 농도가 마산만 내부 해역에서부터 다시 높아진 것을 볼 수 있다. 이것은 1994년에 마산만 준설작업이 종료되었고, 인근 육상으로부터 미처리된 오염물질의 지속적인 유입이 일어나기 때문인 것으로 생각된다.

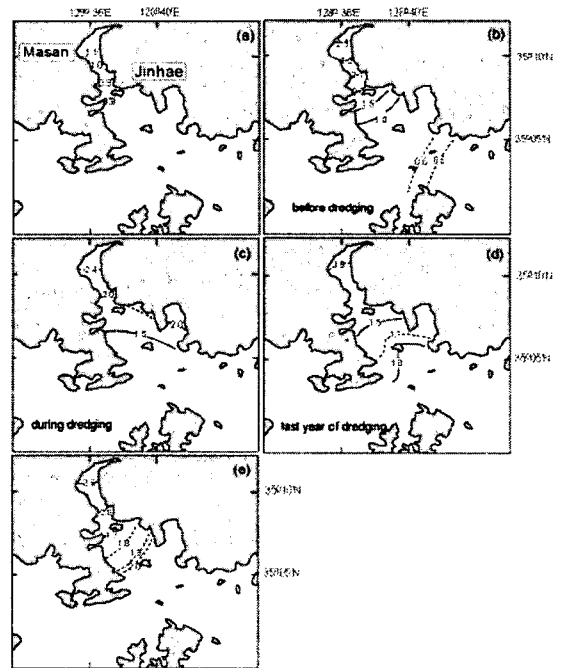


Fig. 11. Horizontal distribution of DIP ($\mu\text{g-at/l}$) in the bottom of Jinhae bay, 1981(a), 1989(b), 1991(c), 1994(d) and 1998(e).

4. 고찰

1. 해양오염해역의 확장

Fig. 3-Fig. 5에서 나타낸 것 처럼 1981년부터 1998년까지 A와 B지역에서 COD, DIN, DIP의 연도별 농도를 살펴보면, 표층 DIN과 DIP의 농도가 A지역에서는 각각 $31.72\text{-}166.92\mu\text{g-at/l}$, $1.04\text{-}6.37\mu\text{g-at/l}$, B지역에서는 각각 $15.91\text{-}86.62\mu\text{g-at/l}$, $0.32\text{-}2.86\mu\text{g-at/l}$ 로 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 마산만으로 영양염류의 과잉 유입과 함께 마산만이 외해와의 해수 교환율이 낮기 때문인 것으로 생각된다. 김 등(1986)의 연구에 의하면 1985년 하계 마산만에서 대소조기의 해수 교환 특성을 분석한 결과 해수 교환율

은 대체로 10% 미만의 적은 값을 나타내었으며, 수심 4m 이심에서는 유속이 0-2cm/s에 불과하였다. 또한 Kang et al., (1989)의 연구에서처럼 1989년 마산만에서 오염물질 확산 시뮬레이션 결과 마산만에서는 조류가 오염된 물을 교환시킬만큼 충분히 크지 않다는 연구 결과와도 일치한다.

연구해역에서 COD, DIN, DIP의 공간적인 분포양상을 표층과 저층으로 구분하여 Fig. 6-Fig. 11까지 나타내었는데, 이것을 보면 만의 오염이 마산만의 안쪽에서부터 바깥쪽으로 확산되었다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2에서 보았듯이 연도별 인구수나 공장수가 점차 증가하는 등 육상 기원의 오염이 가중됨에 따라 오염물질들이 농도가 아주 높게 나타나고(金 등, 1986) 그 오염이 점차 만의 바깥쪽으로 확산되는 것으로 생각된다.

1981년부터 1998년까지 마산만 안쪽 해역인 A 지역이 소모도 부근의 B 지역 (Fig. 1)에 비해 부영양화물질인 DIN과 DIP의 표준편차가 표층에서는 2배정도 크게 나타났다. 그리고 저층에서도 DIN의 경우는 A지역이 B지역보다 표준편차가 1.5배 정도 크게 나타났다(Table 1). 또한 표층 COD, DIN, DIP의 평균 농도도 A 지역이 B 지역보다 COD는 1.2배 정도, DIN과 DIP는 2배 정도 높게 나타났다(Fig. 7-9). 이것은 마산시와 창원시의 주요 하천수의 직접적인 유입이 바로 A 지역으로 일어나며, 오염원에 인접한 지역으로서 환경변동의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 생각된다. 이와 권(1994)은 마산만 일원에서 주요 하천을 통해 생활하수가 유입이 되고, 이들 하천을 통해 마산만으로 유입되는 총 부하량은 총량의 약 72%를 차지한다고 하였다. 또 梁 등(1994)은 마산만 유입 총 평균 유량중 창원과 마산지역에서 약 80%가 유입되고 있다고 보고한 것과 관련이 있는 것으로 생각된다.

이상과 같이 마산만은 그 지형이 좁고 긴 만으로 해수교환이 잘 되지 않을 뿐만 아니라 느린 유속으로 인하여 오염물질이 서서히 만 내로 유입이 되어도 결국은 그 양이 점점 축적되어 마산만의 수질을 더욱더 악화시켜 왔다고 판단된다.

2. 오염원 여건 변화와 해양환경과의 관계

마산만에서 COD, DIN, DIP의 오염인자들의 변동은 그 주변 오염유발 가능성이 있는 육상환경 변화에 크게 의존된다. Fig. 2와 같이 주변 도시의 인구수는 1981년 642,620명에서 1998년에는 1,075,787명으로 1981년에 비해 약 1.7배년까지와 1994년에 공장수의 급격한 증가가 나타났다. 이와 같이 연구기간동안 오염원들의 변동이 있었음을 알 수 있는데, 이들 오염원들의 변화와 연안역의 해양환경과는 어떠한 상관관계가 있는지를 분석하였다.

상관계수 (r)은 식(1)에 의하여 계산하였고, 유의수준 5% 및 1% (t-test)로 정하였다. 여기서 X, Y는 변수로서 각각 수질 인자와 오염원 요인 인자를 나타내고 \bar{X} , \bar{Y} 는 표본 평균을 나타낸다.

$$\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y}) / \sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

먼저, 1981년부터 1988년까지 해역의 오염 정도를 나타내는 수질 인자인 COD, DIN, DIP와 환경인자들 즉, 인구수, 공장수 사이의 상관계수를 구하고, 그 다음으로 1981년부터 1998년까지의 기간중 환경 변화가 많았던 1990년부터 1994년을 제외한 자료로 상관분석을 실시하였다. 이렇게 연도를 구분하여 상관분석을 실시한 것은 마산만에서 준설작업이 행해지고, 마산시에 하수처리장이 설치되는 등의 변동이 일어나기 이전의 시기(1981년부터 1988년)와 전 연구기간, 그리고 환경변동이 많았던 1990년부터 1994년까지의 기간을 제외한 전 기간의 상관관계를 각각 분석하여 상호 비교하기 위해서이다.

마산만 주변 도시의 인구수, 공장수 변동과 오염인자들 사이의 상관관계를 주로 분석한 결과, 1981년부터 DIN 농도와 인구수 사이에는 A와 B 지역의 표층에서는 r 값이 0.9 이상으로 아주 높은 양의 상관성이 나타났고, B 지역의 저층에서도 r 값이 0.83으로 높은 상관성이 나타났(Table 2). DIP와 인구수 사이에는 A지역의 저층에서 0.80의 높은 상관성이 나타났다. 1981년부터 1988년까지의 기간동안 DIP와 공장수 사이에는 B지역의 표층에서 r 값이 0.64였다. 이러한 r 값들은 유의수준 1% 또는 5%로 검정하여 채택된 값들이다. 1981년부터 1988년까지 A나 B지역에서 DIN과 인구수 사이의 상관계수가 높은 것으로 보아 인구의 증가와 공장수의 증가로 인해 만으로 유입되는 생활 하수와 산업폐수의 증가가 DIN의 농도 증가에 많은 영향을 미치는 것으로 생각된다.

1981년부터 1998년까지의 기간동안 상관관계를 분석한 결과에 의하면 DIN과 공장수 사이에는 B지역의 표층과 저층에서 r 값이 각각 0.61과 0.51로 나타났다(Table 3). 그리고 DIP와 공장수 사이에는 B지역의 표층과 각각 r 값이 0.77과 0.61로 대체로 높은 양의 상관을 보였다. 같은 기간동안 DIP와 인구수 사이에는 A 지역의 표층을 제외하고는 모두 r 값이 0.66 이상으로 대체로 높게 나타났다.

Table 2. Correlation coefficient between water quality factors and environmental factors in region A and B, 1981-1988

Environmental factors	Region	COD (mg/l)	DIN (μg-at/l)	DIP (μg-at/l)	
Population	A	S	0.29	0.92**	0.41
		B	0.21	0.55	0.80**
	B	S	0.59	0.91**	0.32
		B	0.63*	0.83**	0.42
Number of factories	A	S	0.02	0.45	0.46
		B	0.20	-0.20	0.47
	B	S	0.23	0.46	0.64*
		B	-0.03	0.42	0.31

(**P<0.01, *P<0.05), S: surface, B: Bottom

1990년부터 1994년까지의 환경변동이 많았던 기간을 제외

하고 상관분석을 실시하면 전 연구기간에 걸쳐 상관분석을 실시한 것보다는 육상 오염원 인자들과 수질인자들 사이의 상관계수가 더 높을 것으로 예상하였다.

그 결과, 1990년부터 1994년까지의 기간을 제외한 기간동안 DIP와 인구수 사이의 r 값은 A지역 저층에서 0.70이었고 표저층에서는 0.77로 연구 전기간동안 보다는 조금 더 높게 나타났다(Table 4).

DIP와 인구수 사이의 상관계수는 1981년부터 1988년까지의 기간동안에는 A지역의 저층에서만 높게 나왔는데, 1998년까지 비교해보았을 때는 A와 B 두 지역 모두에서 대체로 높은 값이 나타났다. 그리고 1981년부터 1998년까지 상관계수 분석 결과를 보았을 때, A 지역은 B 지역에 비해 DIN, DIP와 인구수, 공장수와의 상관관계가 거의 나타나지 않았다. 이것은 A 지역이 인근 육상에 근접해 있기 때문에 육상의 영향을 직접적으로 받아 일정한 경향성 없이 수질 환경의 변화가 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3. Correlation coefficient between water quality factors and environmental factors in region A and B, 1981-1998

Environmental factors	Region	COD (mg/l)	DIN ($\mu\text{g-at/l}$)	DIP ($\mu\text{g-at/l}$)	
Population	A	S	-0.31	0.19	0.12
		B	-0.15	-0.19	0.66**
	B	S	-0.17	0.41	0.77**
		B	0.18	0.46*	0.68**
Number of factories	A	S	-0.61*	0.43	-0.10
		B	-0.47	-0.17	0.45
	B	S	-0.44	0.61*	0.77**
		B	-0.22	0.51*	0.61*

(**P<0.01, *P<0.05), S: surface, B: Bottom

Table 4. Correlation coefficient between water quality factors and environmental factors in region A and B from 1981 to 1998, except 1990-1994

Environmental factors	Region	COD (mg/l)	DIN ($\mu\text{g-at/l}$)	DIP ($\mu\text{g-at/l}$)	
Population	A	S	-0.20	0.11	0.24
		B	0.15	-0.19	0.70*
	B	S	-0.02	0.45	0.77**
		B	0.27	0.56*	0.77**
Number of factories	A	S	0.02	0.45	0.46
		B	0.20	-0.20	0.47
	B	S	0.04	0.58	0.63*
		B	-0.29	0.20	0.68*

(**P<0.01, *P<0.05), S: surface, B: Bottom

3. 만의 해양오염 추이 분석

마산만에서의 수질을 개선시키기 위한 노력의 일환으로 준설작업을 하고, 하수처리장을 설치하기 이전인 1981년부터 1988년까지 마산만 부근 해역에서 오염을 나타내는 인자인

COD, DIN, DIP의 농도 변동과 주변 도시의 오염원 변동과의 관계를 살펴본 결과 주변 도시의 인구수나 공장수의 증가 등이 마산만 수질에 영향을 미치는 요인으로 나타났다.

마산만의 오염 진행 정도를 예측하기 위해 마산만에서 준설이 행해졌던 시기(1990년부터 1994년)와 마산시에 하수처리장이 설치되었던 시기(1993년)를 기준으로 해서 1981년부터 1988년까지의 수질과 1995년 이후의 수질 변동을 살펴보았다(Fig. 3-Fig. 5).

1981년부터 1998년까지 COD, DIN, DIP의 연변동 양상은 1988년 이전까지는 지속적으로 증가하는 경향을 보였고, 마산만의 오염을 완화시키기 위한 노력의 일환으로 준설이 행해지고, 하수처리장이 설치된 이후로는 COD, DIN, DIP의 농도가 감소했다가 다시 증가하는 추세를 보였다. 그리고 DIP의 경우는 1995년 이후로 농도의 증가가 더 급격하게 나타났다. 특히 DIN과 DIP는 저층 퇴적물에 대한 준설 작업이 진행중이었던 1991년과 1993년에는 높은 농도를 보이다가 준설작업이 종료되고, 마산시의 하수처리장이 가동된 후에는 일시적인 농도의 감소가 나타났다. 이것으로 보아 마산만에서 저층 퇴적물의 준설이나 하수처리장의 가동이 만의 오염을 저감시키는데 일시적으로 감소된 후에 다시 증가하는 추세로 보아 인근 육상으로부터 오염물질들의 지속적인 유입이 있고, 이에 따라 만의 자정능력 한계를 초과하여 만의 오염은 다시 증가하는 것으로 생각된다.

그리고 오염인자들의 공간적인 분포를 보았을 때 표층 COD의 경우 준설후에 뚜렷한 농도의 감소가 나타났으나 DIN과 DIP의 경우는 준설전이나 후에 농도가 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다(Figs. 6, 7 and 8). 이와 권(1994)도 준설 기간 동안 COD의 농도가 다소 감소하는 등 수질 개선효과가 나타났다고 보고하였다.

또한 마산만의 내부 해역은 거의 매년 DIN과 DIP의 농도가 높게 유지되고 있는데, 이것은 내만 유역에 마산만의 오염원이 집중되어 있고, 마산만 유역에서 생활하수 및 산업폐수가 계속적으로 유입되고 있기 때문인 것으로 사료된다.梁 등(1984)도 마산만의 지형적인 조건으로 인해 해수의 자정작용을 기대할 수 없으며, 만 주변에 공업단지들이 산재해 있어 이들 공업폐수에 의해 마산만의 오염이 가중되고 있다고 보고한 바 있다.

인근도시의 인구 증가, 공장수 증가 등 마산만으로 유입되는 오염부하가 지속적으로 증가하는 한 마산-진해만의 오염은 계속 가중될 것으로 예상된다. 그리고 1995년 이후의 자료의 수가 적어서 만의 오염에 관한 정확한 추이를 분석하는 것이 어려우나, 더 많은 자료를 확보하여 연구를 진행하면 만의 해양 오염에 관한 예측이 가능하리라 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마산만 주변해역의 주 오염원으로 예상되는

마산, 창원, 진해시의 주변 환경 변동과 오염인자(COD, DIN, DIP)들 사이에 어떠한 관련성이 있는지를 분석하였다.

1) 1981년부터 1998년까지 마산만의 안쪽인 A 지역과 소모도 부근인 B 지역에서 해역의 오염을 나타내는 인자인 COD, DIN, DIP의 연도별 농도 분포 양상은 마산만 안쪽 영역인 A 지역에서 인자들의 농도가 높게 나타났으며, 표준 편차도 크게 나타났다. 이것은 A 지역이 B 지역에 비해 육상 오염원에 근접해 있으며, B 지역에 비해서 해수의 유동이 원활하지 않고 유속이 느려 오염물질의 지속적인 유입으로 점차 오염이 가중되어 온 것으로 생각된다. 그리고 1993년 마산시에 하수처리장이 설치된 후에 DIN 농도의 일시적인 감소 현상이 나타났다.

2) 마산만에서 준설이 1990년 7월부터 1994년 12월까지 행해지고, 마산시에 하수처리장이 1993년 11월부터 가동이 되었는데, 오염인자를 시공간적인 분포에서는 표층 COD의 경우는 준설에 의한 농도의 감소가 나타난 것으로 보였다. 또한, 오염인자들의 공간적인 분포를 보았을 때, 진해만의 오염은 1981년부터 1990년대 후반으로 갈수록 점차 가중되어 왔으며, 마산만의 안쪽에서부터 바깥쪽으로 오염이 점차 확산되었다.

3) 오염인자들과 환경변동과의 상관분석 결과, 1981년부터 1988년까지는 A와 B 지역에서 DIN 농도와 인구수 사이에는 상관계수가 0.8 이상으로 높은 양의 상관성이 나타났다. 이것으로 마산만 인근 도시에서의 미처리된 생활하수의 유입이 만의 오염에 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다. 1981년부터 1998년 까지 전 연구기간에 걸쳐서는 DIP와 인구수 사이 상관계수가 A 지역의 표층을 제외하고는 0.65 이상이 나타났으며, B 지역에서는 DIP와 공장수 사이의 상관계수가 표저층에서 각각 0.77, 0.61로 대체로 높게 나타나, 인근 도시에서 공장수의 증가가 진해만의 오염을 가중시키는데 큰 영향을 미친 것으로 생각된다.

4) 마산만 부근 해역의 오염에는 인근 육상으로부터 오염물질의 유입이 큰 영향을 미치는 것으로 사료되는데, 연도별 인구수나 공장수가 지속적으로 증가하는 추세로 보아 오염원에 대한 철저한 규제 없이는 인근 도시의 생활하수와 산업폐수에 의한 진해만의 오염은 점차 가중될 것으로 보인다. 이렇게 육상 오염원의 영향을 크게 받는 마산만의 오염을 저하시키기 위해서는 만 내부 해역에 대한 집중적인 관리가 필요하며, 각종 오염원에 대한 처리 시설을 강화 하여 마산만으로 유입되는 오염원을 감소시키는 일이 시급한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

[1] 국립수산진흥원(1987), 사업보고 제69호, pp.119-142.
 [2] 국립수산진흥원(1996), 한국연안어장환경오염조사 결과 보고서, pp.141-167.
 [3] 국립수산진흥원(1996), 1995년도 국립수산진흥원사업보

고서, pp.74-79.
 [4] 국립수산진흥원(1997), 한국해양환경 조사연보(1996), 1, pp.72-75.
 [5] 국립수산진흥원(1998), 한국해양환경 조사연보(1997), 2, pp.72-73.
 [6] 기상청(1991-1998), 기상월보.
 [7] 金鍾華, 張善德, 金三坤(1986), 마산만의 해수유동에 관하여, Bull. Korean Fish. Soc. 19(3), pp.274-280.
 [8] 마산시(1982-1999), 마산통계연보.
 [9] 朴周錫, 金鍾斗(1967), 鎭海灣의 赤潮現象에 關한 研究, 국립수산진흥원 연구보고, 43, pp.65-79.
 [10] 梁鼎成, 洪錫, 金永局(1984), 馬山灣의 水質調査에 關한 研究, 경남대학교 환경연구소보, 6, pp.21-39.
 [11] 劉光日, 李俊伯(1985), 馬山灣의 環境學的 研究 3.雙鞭毛藻類 群集의 動態에 대하여, Bulletin of Environmental Sciences, 6, pp.117-127.
 [12] 유광일, 이준백(1990), 마산만의 환경학적 연구 4, 1986-1987년간의 해양환경 특성, 漢陽大學校 環境科學論文集, 11, pp.55-74.
 [13] 이규환(1994), 마산만 준설에 따른 환경 특성의 변화, 경남대학교 한국보호학과 석사학위논문.
 [14] 이문옥, 백상호(1998), 판별함수에 의한 진해만 적조예측, 한국환경과학회지, 제7권(제1호), pp.8-19.
 [15] 이찬원, 민병윤, 손성원(1989), 마산만의 해수오염 추이 및 대책, 경남대학교 부설 환경연구소 연구보고, 11, pp.85-111.
 [16] 이찬원, 권영택(1994), 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링, 경남대학교 환경문제연구소, pp.264.
 [17] 魏晟旭(1994), 大規模 河·廢水終末處理場의 海洋放流에 따른 馬山灣의 環境變, 경남대학교 대학원 환경보호학과 석사학위논문.
 [18] 조경계, 최만영, 박승국, 임성호, 김대운, 박종규, 김영의(1998), 마산-진해만의 수질 부영양화 및 계절 변동, 한국해양학회지[바다], 3(4), pp.193-202.
 [19] 조규대 등(1994), 해양학개론, 태화출판사, pp.141-142.
 [20] 진해시(1986-1999), 진해통계연보.
 [21] 창원시(1986, 1994, 1995, 1997), 창원통계연보.
 [22] 환경부(1991), 진해만 일원 오염 실태 조사, pp.245-349.
 [23] Kang, S.W., T. S. Jung, J.C. Lee and C.S. Kim(1989), Circulation and dispersion of pollutant in Masan-Jinhae bay, Inst. Environ. Res., Kyungnam Univ., 11, pp.47-72.
 [24] Lee, K.W.(1980), Transport of pollutants in Korean coastal waters, Bulletin of KORDI, 2, pp.23-29.
 [25] Lee, K. W., G. H. Hong, D. B. Yang, and S. H. Lee (1981), Seawater quality and red tides in Jinhae bay: I. Relationships between water quality parameters and red tides, J. Oceanol. Soc. Korea, 16(2), pp.43-48.
 [26] 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(1), pp.26-31.

[27] Yoo, K. I. and J. H. Lee(1980), Environmental studies of the Jinhae bay: 2. Environmental

parameters in relation to phytoplankton population dynamics, J. Oceanol. Soc. Korea, 15(1), pp.62-65.

원고접수일 : 2004년 11월 26일

원고채택일 : 2004년 12월 24일