Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol. 4, No. 3. pp. 3~15, August. 2001

목포항의 수질 및 부영양도의 계절 변화

김광수(1)

Seasonal Variations of Marine Water Quality and Eutorphication Index in Mokpo Harbour

by
Kwang Soo Kim(1)

요 약

목포항의 수질과 영양상태의 계절 변화를 구명하고 평가하기 위하여 1996년 8월부터 1999년 8월까지 3년간 현장 관측과 수질 분석을 실시하였다. 첫째, 투명도, 용존무기질소, 인산인 및 클로로필 a와 같은 수질 항목에 대하여 OECD 영양분류기준을 적용한 결과, 목포항 해수의 영양수준은 4계절 내내 중영양 내지 부영양 상태로 평가되었고, 특히 하계에는 부영양 상태로 나타났다. 둘째, 비록 목포항 수질은 화학적 산소요구량에 의하면 해역수질 환경기준의 2급수 내지 3급수로 평가되지만, 부영양화에 의한 오염지수를 산정한 결과에 의하면, 목포항은 수질이 악화되어 4계절 내내 3급수에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 셋째, 부영양도를 산정한 결과, 특히 하계 또는 추계에 목포항에서 적조 발생 잠재력이 높은 것으로 나타났다. 넷째, 해수중에 존재하는 인에 대한 질소의 평균원자비(N/P)를 살펴보면, 목포항에서 식물플랑크톤의 성장에 대한 제한 영양 인자는 질소라기보다는 인으로 나타났다.

Abstract

The in situ observations and the seawater analyses were conducted for 3 years from August 1996 to August 1999 in order to elucidate and evaluate seasonal variations of marine water quality and trophic state in Mokpo harbour of Korea. Compared the seasonal seawater qualities of Mokpo harbour with the OECD standards of trophic classification in parameters such as Secchi depth, dissolved inorganic nitrogen, phosphate phosphorus and chlorophyll-a, the trophic level of seawater in Mokpo harbour was evaluated to be in mesotrophic or eutrophic state through all 4 seasons and to be in eutrophic state, particularly in summer. The estimation of pollution index by eutrophication showed the seawater quality of Mokpo harbour to deteriorate and fall under the regular grades through all 4 seasons, although the seawater quality of Mokpo harbour was evaluated to be equivalent to the second or third class of the Korean seawater quality standards in view of COD values. The results of eutrophication index estimation showed the high potentiality of red tide occurrence in Mokpo harbour, particularly in summer or fall. In the light of the average atomic ratio of N/P in

(1) 정회원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부, gwngskim@mail.mmu.ac.kr

seawater, the limiting nutrient factor against the growth of phytoplankton was concluded to be phosphorus rather than nitrogen in Mokpo Harbour.

Keywords : Marine water quality, Trophic level, Pollution index by eutrophication, Eutrophication index, Red tide

1. 서 론

한반도 서남권의 영산강 하구에 위치한 목포항은 북쪽의 무안반도와 남쪽의 영암반도 그리고 동쪽의 영산강 하구둑으로 둘러싸여 있으며, 그 입구가 서쪽의 고하도, 달리도, 눌도 등 수많은 섬에 의하여 둘러싸인 천혜의 선박 피항지로서, 고하도 북단의 용두와 무안반도 남서단의 서각을 잇는 선이 그 항계로 되어 있었다. 그러나 최근에 새로운 외항이 개발되면서 장좌도, 달리도, 화원반도, 금호방조제 및 영암방조제에 이르기까지 항계의 범위를 확대하였다. 목포항은 서남권의 생활 및 사회·경제 활동과 밀접한 관계를 유지하고 있어서 서남권의 물류중심항으로서 그리고 인근 도서민의 생활기지항으로서 그 역할이 증대되면서 새로운 부두와 항만의 건설, 항내의 준설사업 등이 진행되고 있다. 또한 수자원 관리를 위한 영산강 하구둑의 건설, 임해산업기지화를 위한 대불산업단지의 조성과 해안 매립, 다도해를 이용한 해양관광사업 등 각종 개발 활동이 목포항 주변에서 이루어져 왔다.

이러한 인간 활동으로 인한 자연환경 변화는 목포항과 그 주변 해역의 수질 변화에 지대한 영향을 미치게 되었다. 목포항을 중심으로 한 주변 해역의 해수는 선박통항로를 제공할 뿐만 아니라 해수욕장, 해양관광, 바다낚시 등 심미적·오락적으로 이용되고 있으며, 염전, 냉각수, 담수화와 같은 공업적 용도와 수산·양식의 용도 등 다양한 목적으로 이용되고 있는 귀중한 수자원이다. 이렇게 다양한 용도를 가진 해수자원이 해양수질 오염으로 인하여 각 용도에 필요한 수질을 유지하지 못하면, 해수 이용에 지장을 받게 된다.

목포항은 폐쇄성이 강한 해역으로서 육상이나 선박으로부터 각종 오염물질이 항내로 유입되면 외해로 쉽게 확산되거나 희석되지 못하고 항내 수역에 축적되기 때문에 수질 악화가 빠르게 진행된다. 결국 목포항 자체의 수질 오염 문제뿐만 아니라 장기적으로는 주변 해역의 수질에도 영향을 미치게 된다. 특히 여름철에 일사량이 증가하고 수중의 성층 현상이 나타나면, 부영양화에 따른 적조 발생과 저층의 빈산소수괴 형성 등 여러 가지 해양오염문제가 발생할 가능성이 있다. 그래서 하수종말처리장을 건설하고 1998년 8월부터 가동을 시작하였다. 그러나 목포남해하수종말처리장은 COD를 기준으로 도시하수의 유기물 오염부하를 제어하는 데에 중점을 두고 있어서, 질소와 인과 같은 영양염류의 처리는 제대로 이루어지지 않고 있다(김[2000]).

질소나 인과 같은 식물영양염류가 해역의 수중에 적당히 들어 있으면 영양염류를 섭취하는 식물플랑크톤이 알맞게 번식하여 해역의 기초생산력이 높아지지만, 육상으로부터 생활하수나 산업폐수가 대량으로 유입하여 해역의 영양염류 농도가 너무 높아지면 해역은 부영양화되고, 해역의 부영양화는 식물플랑크톤이 일시에 대량 번식하는 원인이 되어 적조 현상을 일으킬 수도 있다. 따라서 부영양화의 원인 물질인 질소나 인이 해역에 유입하기 전에, 그것을 육상에서 처리할 수 있는 고차처리 시설의 필요성이 제기되고 있다. 목포항 수역으로 유입하는 영양염류를 제어하기 위하여 고차처리시설을 설계하거나 설치하기 위해서는 우선 유기물 오염 유입부하뿐만 아니라 영양염류 유입부하를 정량적으로 파악함과 동시에 목포항 해수중의 영양염류의 시·공간적 분포와 변화를 조사하는 것이 필요하다(이와 김[1998], 김[2000]).

한편, 선박의 발라스트수를 통하여 적조생물과 같은 유해한 수중생물이나 병원균이 국제간 또는 국내간 각 해역으로 이동되는 것을 최소화하기 위하여 선박 발라스트수의 통제와 관리에 대한 규정이 국제해사기구(IMO)의 해양환경보호위원회(MEPC)에서 마련되고 있어서, 이 규정이 머지않아 국제적으로 시행될 전망이다. 그러므로 목포항에서 선박이 발라스트수를 적재하거나 배출함으로써 또한 육상의 생활하수나 산업폐수가 목포항과 주변해역에 유입함으로써 발생하는 여러 가지 해양오염문제 등을 사전에 예측하고, 이에

따른 최적의 수질관리방안을 강구하는 것이 필요하다. 목포항 수질관리를 위해서는 먼저 다년간에 걸친 수질 조사를 통하여 목포항 수질의 계절 변화 특성을 이해하고, 아울러 적조와 관련된 부영양화의 계절 변화를 구명하는 것이 선행되어야 한다.

해역의 수질관리를 위하여 국내에서는 수소이온농도(pH), 화학적 산소요구량(COD), 용존산소(DO), 부유물질(SS), 대장균군수, 노말핵산추출물질(유분), 총질소 및 총인과 같은 8개의 일반 항목에 대한 기준을 설정함으로써 해역의 수질 등급을 해역의 용도에 따라서 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ등급으로 구분하고 있다. 그러나 이러한 8개의 수질항목 중에서도 주로 화학적 산소요구량(COD)을 수질지표로 이용하고 있어서 해양의 오염현황을 정확히 나타내지 못하는 문제점이 있다(박[1994], 김[1997b]). 그래서 해양에서 부영양화와 관련이 있는 질소와 인의 오염도를 포함하는 오염지표에 대한 개발의 필요성이 제기되면서 Nemerow [1991]가 제안한 오염지수를 사용하여 해역의 수질등급을 분류한 바가 있다(박[1994], 김[1997b]). 이러한 부영양화에 의한 오염지수는 하나의 수질항목만을 고려한 단편적 오염지표가 아니라, 부영양화와 관련된 질소, 인 등의 수질항목들을 고려하여 종합적으로 표현한 오염지표라는 특징을 가진다. 또한 You *et. al.*[1994]은 岡市[1972]가 제안한 부영양도 산정식을 이용하여 황해의 전역에 대한 부영양화를 정량적으로 파악한 바가 있다. 岡市[1972]의 부영양도 산정식을 이용하면, 해역의 부영양도를 정량화할 수 있어서 적조 발생 가능성을 진단할 수 있다. 부영양화에 의한 오염지수와 부영양도를 동시에 산정하여 해역의 부영양화를 정량적으로 파악한 연구는 지금까지 김[1996][1997b]에 의하여 수행된 바가 있고, OECD의 영양단계 분류 기준(OECD, Vollenweider [1982])을 국내의 해역에 적용한 사례는 김[1997b]의 연구를 제외하고는 전무하다.

지금까지 목포항과 그 주변 해역에 대한 환경오염조사(국립수산진흥원[1996])가 수행되었고, 목포항의 개발과 산업공단의 조성에 따른 연안해역의 변화에 관한 연구(이와 정[1991][1992], 정[1992])가 수행된 바가 있다. 또한 목포항의 수질현황을 조사하여 하계의 유기물 오염과 용존산소(김[1997a]) 및 부영양화(김[1997b])를 중심으로 목포항의 수질 특성을 구명한 바가 있으며, 영산강 하구역의 여름철 빈산소수괴 출현과 저서동물 분포(임과 박[1998]), 영산강 하구 퇴적물의 중금속 분포(조와 박[1998]) 그리고 목포항에 유입하는 육상오염부하(이와 김[1998])에 관한 연구가 수행된 바가 있다. 그러나 아직까지 목포항과 그 주변 해역에 대한 다년간의 체계적인 수질 조사가 미흡하며, 그에 따른 종합적인 수질 평가와 관리 대책이 요구되고 있는 실정이다. 그리고 목포항 수질 개선에 대한 목포남해하수종말처리장의 기여도를 유기물 오염지표의 하나인 화학적 산소요구량(COD)을 기준으로 평가하는 연구가 시도되었으나(김[2000]), 목포항의 부영양화 개선에 대한 하수종말처리장의 기여도를 평가하기 위해서는 목포항의 부영양도를 계절별로 조사하는 것이 필요하다.

본 연구는 목포항의 부영양도를 중심으로 수질의 계절적 변화를 정량적으로 구명하고 평가하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위하여 하수종말처리장의 가동 전·후 기간을 포함한 최근 3년간 목포항의 수질을 계절별로 조사한 후, 영양염류, 투명도, 식물색소 등 부영양화와 관련된 수질 항목들에 대하여 OECD의 영양상태 분류기준(Vollenweider[1982])을 적용함과 동시에, Nemerow [1991]의 오염지수 산정식과 岡市[1972]의 부영양도 산정식을 적용하여 목포항의 부영양화 정도를 정량화하였다. 본 연구의 결과는 목포항과 그 주변 해역의 이용 및 보전에 관한 정책 수립뿐 아니라 수질 관리의 기초 자료로 활용될 것으로 기대되며, 또한 하수종말처리장이 목포항 수질 개선에 기여한 정도를 평가하는 데에도 도움이 될 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 수질 조사

2.1.1 채수

목포항의 수질을 조사하기 위하여 목포해양대학교의 선박 "전남 706호"를 이용하여 1996년 8월부터 1999년 8월까지 3년간 계절별로 Fig. 1에 제시한 목포항 13개 정점의 표층(수면하 약 1m)과 저층(해저로부터 약 1m)의 해수를 Niskin 채수기로써 낙조시에 채취한 후, 실험실로 신속히 운반하여 분석하였다. 그러나 1996년 추계에는

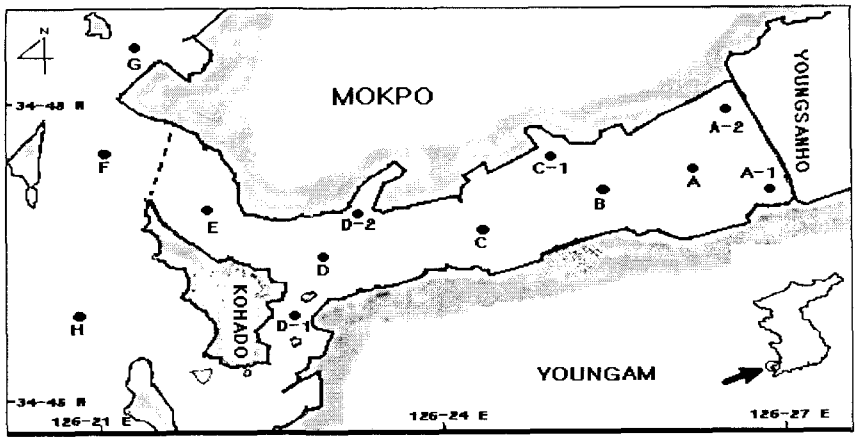

Fig. 1 Sampling stations in Mokpo harbour.

수질 조사를 실시하지 못하였다.

2.1.2 수질 분석

시료수에 대하여 pH, 투명도(Secchi Depth.), 수온(Temperature), 염분(Salinity), 용존산소(Dissolved Oxygen), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand), 총부유성 고형물(Total Suspended Solid), 휘발성 부유물(Volitile Suspended Solid), 암모니아성 질소(NH_3-N), 아질산성 질소(NO_2^--N), 질산성 질소(NO_3^--N), 인산인(PO_4^{3-}-P), 클로로필 a(Chlorophyll a), 입자성 유기탄소(POC) 및 입자성 유기질소(PON)를 측정 및 분석하였다. 그러나 본 연구에서는 투명도(S.D), 용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen : DIN), 인산인(Phosphate phosphorus : Dissolved Inorganic Phosphorus : DIP), 클로로필 a(Chl-a) 및 화학적 산소요구량(COD)에 대한 자료만을 제시하였다. 투명도는 직경 30㎝의 백색 원판을 사용하여 현장에서 측정하였고, 아질산성 질소는 Sulfanilamide-NED법, 질산성 질소는 Cadmium-reduction법, 암모니아성 질소는 Indophenol법, 인산인은 Ascorbic acid법, Chlorophyll-a는 Strickland and Parson[1972] 방법에 의하여 각각 비색정량하였다. 그리고 화학적 산소요구량은 실험실에서 알칼리성 과망간산칼륨법으로 정량하였다(日本分析化學會北海道支部[1981]). 여기서 용존무기질소는 아질산성 질소, 질산성 질소 및 암모니아성 질소의 합계로 표현하였다.

2.2 수질 평가

2.2.1 OECD의 영양상태기준에 의한 분류

목포항의 영양상태를 분류하기 위하여 수층별 수질 분석 자료에 대하여 Table 1에 제시한 OECD의 영양단계 분류 기준(Vollenweider[1982])을 적용하였다.

Table 1 Classification of trophic state in the OECD eutrophication program (Vollenweider[1982])

Parameter	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic	Hypertrophic
Secchi depth(m)	5.4~28.3	1.5~8.1	0.8~7.0	0.4~0.5
Nitrogen(㎎/ℓ)	0.307~1.387	0.361~1.630	0.393~6.100	
Phosphorus(㎎/ℓ)	0.003~0.018	0.011~0.096	0.016~0.386	0.750~1.200
Chlorophyll-a(㎎/㎥)	0.3~4.5	3.0~11.0	2.7~78.0	100~150

2.2.2 오염지수 산정

해역의 부영양화와 관련된 수질 항목들, 즉 화학적 산소요구량(COD), 용존무기질소(DIN) 및 인산인(DIP : PO_4^{3-}-P)을 이용하여 오염지수(Pollution Index by eutrophication)를 산정하는 식은 다음과 같다(Nemerow[1991]).

$$PIe = \sqrt{\frac{\max.(C_i/L_{i,1st})^2 + \mathrm{mean}(C_i/L_{i,1st})^2}{2}} \quad (1)$$

여기서, C_i는 복수의 수질 항목 중에서 i번째 수질 항목의 농도를 의미하며, $L_{i,1st}$는 i번째 수질 항목에 대한 1등급 수질 기준 농도를 나타낸다. 또한 max.는 최대값을, mean은 평균값을 말한다.

목포항의 표층수 및 저층수에 대하여 한국의 해역수질기준 1등급의 COD, 용존무기질소(DIN) 및 인산인(DIP : PO_4^{3-}-P)을 기준으로 부영양화에 의한 오염지수(PIe)를 산정하였으며, 오염지수(PIe)가 1 이하이면 1등급 수질, 2 이하이면 2등급 수질, 4 이하이면 3등급 수질, 4 이상이면 등급외의 수질로서 평가하였다.

2.2.3 부영양도 산정

岡市[1972]는 COD 1㎎/ℓ, 용존무기질소(무기태 질소) 100㎍/ℓ 및 인산인(무기태 인) 15㎍/ℓ의 일본수산환경수질기준을 이용하여 일반 해역에서 부영양화의 진행 정도를 나타내는 하나의 척도로서 부영양도(Eutrophication Index)를 다음식으로 표현하였다. 부영양도가 1 이상이면 일본수산환경수질기준을 초과하여 적조 발생 가능성이 있다.

$$\text{부영양도(EI)} = \frac{\text{화학적 산소요구량(㎎/ℓ)} \times \text{무기태 질소(㎍/ℓ)} \times \text{무기태 인(㎍/ℓ)}}{1{,}500} \quad (2)$$

적조의 발생에 관여하는 유기물(COD) 및 영양염(용존무기질소 및 인산인)의 수층별 농도를 이용하여 목포항의 표층수 및 저층수에 대한 부영양도를 산정함으로써 수질을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

목포항의 13개 정점에 대한 수질 조사 및 분석 결과를 평균하여 정리한 계절별 수층별 수질 자료는 Table 2에 제시한 바와 같다.

Table 2 Seasonal mean results of seawater analyses for the entire Mokpo Harbour for 3 years (1996 to 1999)

Items \ Season	Year	1996	1997				1998				1999		
	Month	Aug.	Jan.	Apr.	Aug.	Nov.	Feb.	Apr.	Jul.	Nov.	Feb.	Apr.	Aug.
Secchi Depth (m)		1.3	2.0	1.7	2.4	2.2	1.6	1.9	1.6	2.5	2.5	2.7	0.8
COD (㎎/ℓ)	Surface (S)	3.51	2.28	3.05	1.23	3.27	2.54	1.71	1.81	2.48	1.42	3.14	3.25
	Bottom (B)	2.48	2.27	2.62	0.22	3.41	2.34	0.92	1.38	2.60	1.65	2.12	1.66
	Mean(S & B)	3.00	2.28	2.84	0.73	3.34	2.44	1.32	1.60	2.54	1.54	2.63	2.46
DIN (㎎/ℓ)	Surface (S)	0.678	0.196	0.216	0.387	0.151	0.235	0.251	0.255	0.329	0.119	0.215	0.575
	Bottom (B)	0.261	0.156	0.187	0.375	0.113	0.243	0.229	0.384	0.340	0.160	0.242	0.195
	Mean(S & B)	0.470	0.176	0.201	0.381	0.132	0.239	0.240	0.320	0.335	0.140	0.229	0.385
DIP (㎎/ℓ)	Surface (S)	0.011	0.030	0.007	0.029	0.018	0.016	0.016	0.033	0.016	0.009	0.007	0.010
	Bottom (B)	0.026	0.029	0.020	0.033	0.022	0.022	0.019	0.064	0.019	0.010	0.028	0.029
	Mean(S & B)	0.018	0.029	0.013	0.031	0.020	0.019	0.017	0.048	0.017	0.009	0.018	0.020
Chl-a (㎎/㎥)	Surface (S)	26.72	2.18	15.95	1.32	6.91	21.44	6.12	12.07	6.81	8.65	5.92	14.65
	Bottom (B)	1.38	1.73	2.78	1.70	3.82	7.68	9.22	3.55	3.73	12.08	4.17	5.20
	Mean(S & B)	14.05	1.95	9.37	1.51	5.36	14.56	7.67	7.81	5.27	10.37	5.05	9.93

3.1. 수질 평가

3.1.1 영양 상태

Table 2에 제시된 투명도, 용존무기질소, 인산인 및 엽록소 a(Chlorophyll-a)에 대하여 OECD의 영양단계 분류 기준(Vollenweider[1982])을 적용함으로써 목포항 해수의 영양 상태를 평가하였다.

(1) 투명도(S.D)

Table 2와 Fig. 2에 제시한 바와 같이, 투명도는 춘계의 경우에 1.7~2.7m, 하계의 경우에 0.8~2.4m, 추계의 경우에 2.2~2.5m, 동계의 경우에 1.6~2.5m로서, OECD의 영양단계 분류 기준에 의하면 모든 계절에 걸쳐서 중영양~부영양 상태의 특성을 보였다. 특히 하계에 부영양 상태의 특성을 나타낸 것은 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 성장과 관계가 있는 것으로 보이며, 실제로 하계 강우시 목포항의 투명도는 영산강 하구둑의 수문 개폐에 따른 담수 유입에 영향을 받는다(김[1997a]). 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에는 추·동·춘계에 목포항의 투명도가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 1999년 8월의 하계에는 오히려 투명도가 크게 감소하였으며, 이것은 주로 영산강 일대의 하계 집중호우에 의하여 목포항으로 유입된 총부유성 고형물의 증가에 기인하는 것으로 보인다. 또한, 그 원인의 일부는 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 증식에 기인하는 것으로 보인다.

(2) 화학적 산소요구량(COD)

Table 2와 Fig. 3에 제시한 바와 같이, 유기물 오염지표로 이용되는 화학적 산소요구량(COD)은 계절에 따라서 차이가 컸으며, 동일한 계절에도 연도별로 차이가 나타났다.

춘계에는 표층과 저층에서 각각 1.71~3.14㎎/ℓ과 0.92~2.62㎎/ℓ로서 대체로 Ⅱ~Ⅲ등급의 수질을 보였고, 하계에는 표층과 저층에서 각각 1.23~3.51㎎/ℓ, 저층에서 0.22~2.48㎎/ℓ로서 Ⅰ~Ⅲ등급의 수질을 보였으며, 동일한 하계에도 연도별 차이가 크게 나타났다. 즉, 1996년의 하계에는 평균 Ⅲ등급, 1997년의 하계에는 평균 Ⅰ등급, 1998년의 하계에는 평균 Ⅱ등급의 수질을 보였다. 이러한 결과는 하계의 COD 분포가 표층에서 1.13~11.28㎎/ℓ, 저층에서 0.77~7.32㎎/ℓ를 나타낸 진해만(김[1994])보다는 양호한 상태를 유지하고 있으나, 하계의 COD 분포가 표층에서 0.40~3.06㎎/ℓ, 저층에서 0.58~2.26㎎/ℓ를 나타

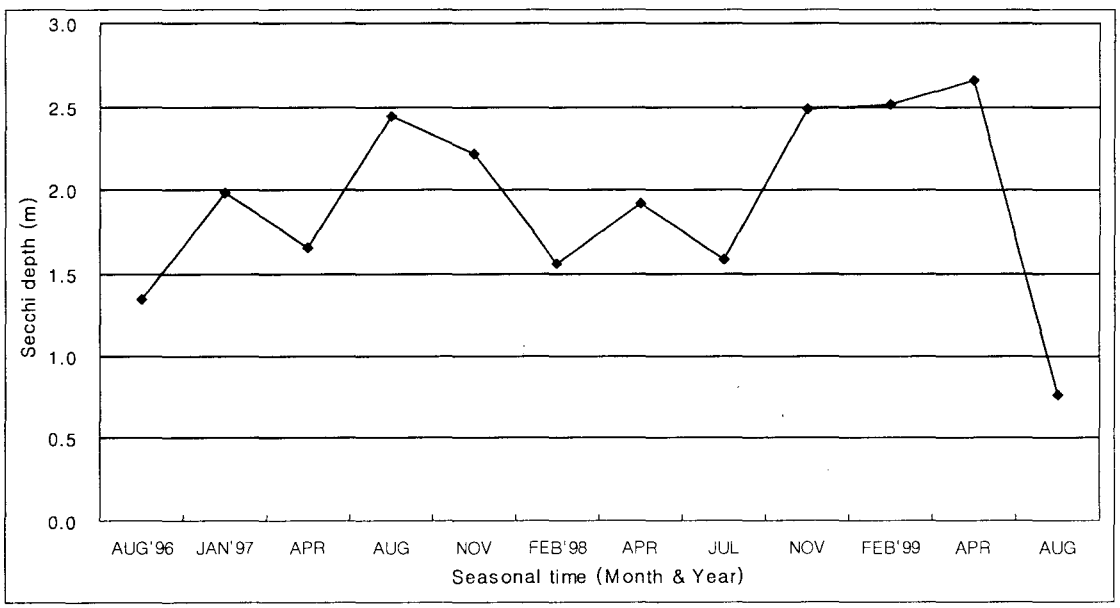

Fig. 2 Seasonal variations of mean transparency in the entire Mokpo harbour for 3 years(1996 to 1999).

낸 가막만(조 등[1994])과는 유사한 값을 보였다. 1997년의 하계 수질 조사는 백중사리 기간 중에 실시되었다는 점을 고려하면, 반폐쇄성의 목포항은 외해와의 해수교환이 큰 대조기에 혼합·희석 등의 자연작용에 의하여 수질이 상당히 정화되는 것으로 판단된다. 추계에는 표층과 저층에서 각각 2.48~3.27㎎/ℓ과 2.60~3.41㎎/ℓ로서 Ⅲ등급의 수질을 보였으나, 연도별로 다소 차이가 있었다. 1998년 추계의 수질이 1997년 추계보다 다소 개선된 것은 1998년 8월부터 시작된 하수종말처리장의 가동과 1998년 하계의 집중 강우에 따른 영산강 하구둑 수문의 개방 등과 관련이 있는 것으로 추정된다. 동계에는 표층과 저층에서 각각 1.42~2.54㎎/ℓ과 1.65~2.34㎎/ℓ로서 Ⅱ~Ⅲ등급의 수질을 보였으며, 연도별로 다소 차이가 있었다. 1997년 1월과 1998년 2월에는 Ⅲ등급의 수질을 보였으나 1999년 2월에는 Ⅱ등급의 수질을 보였다. 1999년 2월의 화학적 산소요구량(COD)이 전년도보다 다소 개선된 것으로 보였으며, 그 원인이 하수종말처리장의 가동과 관련이 있는 것으로 추정이 되지만, 1999년의 춘계에는 Ⅲ등급의 수질로서 1998년 춘계의 Ⅱ등급 수질보다 오히려 유기물 오염이 심화된 점을 고려하면, 하수종말처리장의 가동으로 인하여 목포항의 수질이 개선되었다고 단정하기 어렵다.

Fig. 3에 제시한 바와 같이, 목포항의 모든 조사정점에 대하여 평균한 화학적 산소요구량을 살펴보면, 목포항은 유기물 오염이 진행된 상태로서 평균적으로 Ⅱ~Ⅲ등급의 수질을 나타냈다. 성층현상이 나타나는 춘계와 하계에는 화학적 산소요구량(COD)이 저층보다 표층에서 크게 나타났으며, 이것은 일사량이 많은 표층수 중에서 식물플랑크톤의 활발한 광합성과 증식에 의한 내부생산에 기인하는 것으로 보인다. 또한 춘계와 하계에 용존산소가 저층보다 표층에서 크게 나타난 것도 식물플랑크톤의 광합성에 기인하는 것으로 이와 관련이 있는 것으로 판단된다(김[1999]). 그래서 일사량이 강한 춘계와 하계에는 표층 해수의 화학적 산소요구량이 Ⅲ등급의 수질 기준에도 미치지 못하는 등급외의 수질을 나타내는 수역도 부분적으로 나타났다. 그러나 추계와 동계에는 표층과 저층의 COD가 유사한 값을 보였으며, 이것은 성층현상이 사라져서 표층과 저층간의 연직혼합이 이루어졌기 때문으로 해석된다.

(3) 용존무기질소(DIN)

Table 2와 Fig. 4에 제시한 바와 같이, 용존무기질소는 춘계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.215~0.251㎎/ℓ와 0.187~0.242㎎/ℓ, 하계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.255~0.678㎎/ℓ와 0.195~0.384㎎/ℓ, 추계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.151~0.329㎎/ℓ와 0.113~0.340㎎/ℓ, 동계의

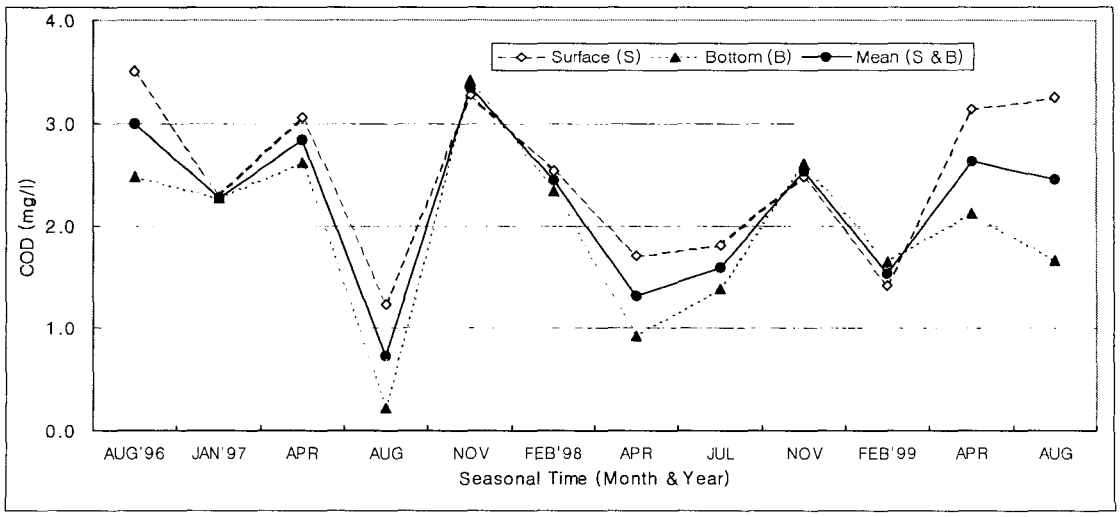

Fig. 3 Seasonal variations of mean COD in the entire Mokpo harbour for 3 years from 1996 to 1999.

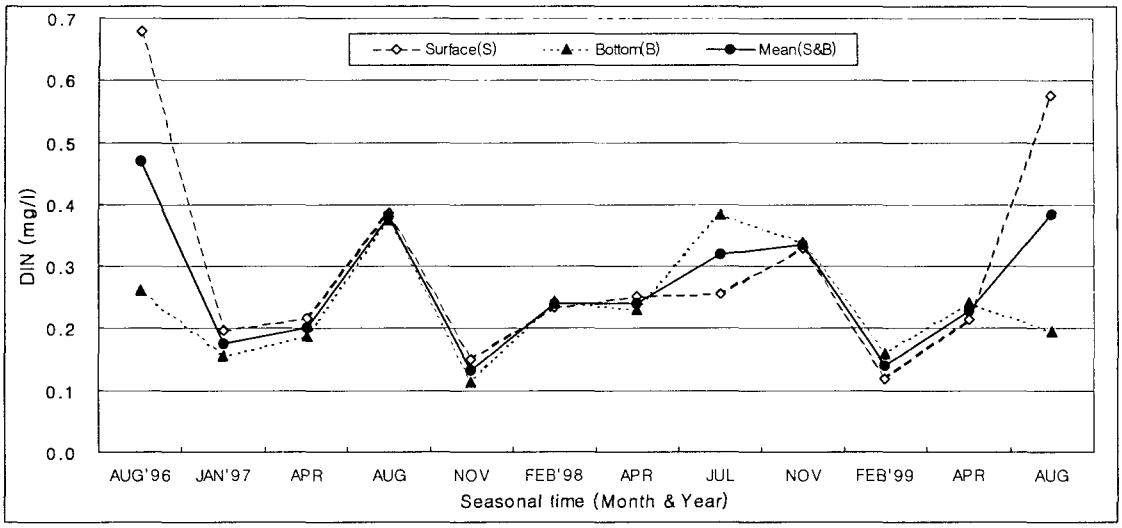

Fig. 4 Seasonal variations of mean DIN in the entire Mokpo harbour for 3 years from 1996 to 1999.

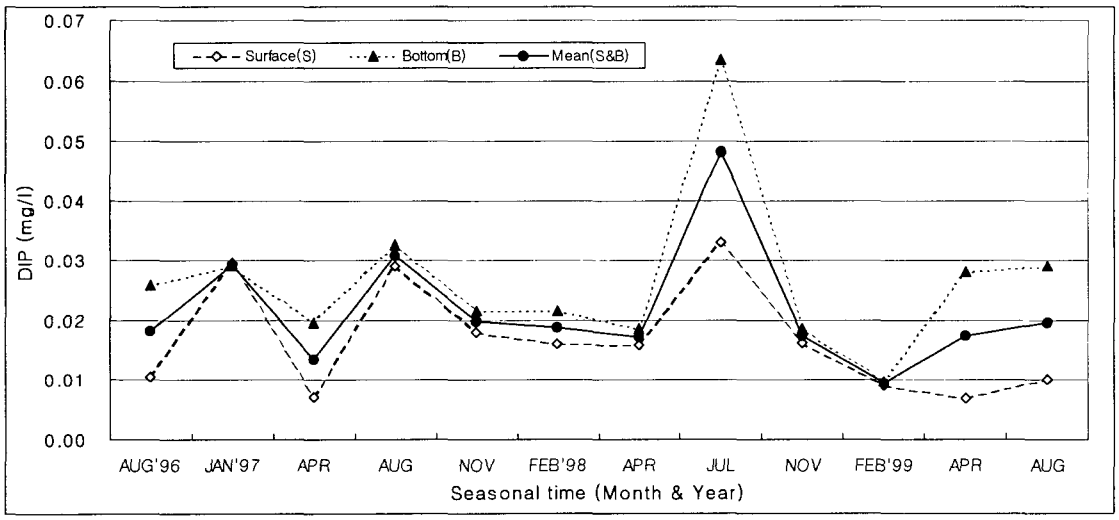

Fig. 5 Seasonal variations of mean DIP in the entire Mokpo harbour for 3 years from 1996 to 1999.

경우 표층과 저층에서 각각 0.119~0.235㎎/ℓ와 0.156~0.243㎎/ℓ로서, OECD의 영양단계 분류 기준에 의하면 모든 계절에 빈영양~부영양 상태를 보였으나, 하계에는 전반적으로 중영양~부영양 상태를 나타내었다. 그리고 표층과 저층의 전수층에서 용존무기질소는 4계절에 걸쳐서 전반적으로 한국의 해역 환경기준의 Ⅲ급수 기준 0.2㎎/ℓ를 초과하여 등급외의 수질을 보였다. 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에도 목포항의 용존무기질소가 감소하는 징후는 뚜렷하게 나타나지 않았다(김[2000]). 용존무기질소의 계절적 변동은 용존무기인 농도의 변동과 Chlorophyll-a 농도의 변동과 관련이 있는 것으로 보인다.

(4) 인산인(DIP)

Table 2와 Fig. 5에 제시한 바와 같이, 인산인은 춘계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.007~0.016

㎎/ℓ와 0.019~0.028㎎/ℓ, 하계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.010~0.033㎎/ℓ와 0.026~0.064㎎/ℓ, 추계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.016~0.018㎎/ℓ와 0.019~0.022㎎/ℓ, 동계의 경우 표층과 저층에서 각각 0.009~0.030㎎/ℓ와 0.010~0.029㎎/ℓ로서, OECD의 영양단계 분류 기준에 의하면 모든 계절에 중영양 상태를 보였으나, 하계에는 전반적으로 중영양~부영양 상태를 나타내었다. 그리고 표층과 저층의 전수층에서 인산인은 4계절에 걸쳐서 전반적으로 한국의 해역환경기준의 Ⅱ급수 기준 0.015㎎/ℓ를 초과하여 Ⅲ등급의 수질을 보였으며, 특히 하계에는 Ⅲ등급을 초과하는 등급외의 수질을 보이는 해(年)도 있었다. 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에도 목포항의 인산인이 감소하는 징후는 뚜렷하게 나타나지 않았다(김[2000]). 인산인의 계절적 변동은 용존무기질소 농도의 변동과 Chlorophyll-a 농도의 변동과 관계가 있는 것으로 보인다.

(5) 엽록소 a(Chlorophyll-a)

Table 2와 Fig. 6에 제시한 바와 같이, 식물플랑크톤 생체함량 지표의 하나인 Chlorophyll-a는 춘계의 경우 표층과 저층에서 각각 5.92~15.95㎎/㎥와 2.78~9.22㎎/㎥, 하계의 경우 표층과 저층에서 각각 1.32~26.72㎎/㎥와 1.38~5.20㎎/㎥, 추계의 경우 표층과 저층에서 각각 6.81~6.91㎎/㎥와 3.73~3.82㎎/㎥, 동계의 경우 표층과 저층에서 각각 2.18~21.44㎎/㎥와 1.73~12.08㎎/㎥로서, OECD의 영양단계 분류 기준에 의하면 4계절에 걸쳐서 대체로 중영양~부영양 상태의 특성을 보였으며, 특히 하계에 있어서 목포항의 엽록소는 전반적으로 표층에서는 부영양 상태의 특성을 나타내었으나, 저층에서는 빈영양~중영양 상태의 특성을 보였다. 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에도 목포항의 Chlorophyll-a가 감소하는 징후는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

표층수의 Chlorophyll-a 농도는 다른 계절에 비하여 하계에 높게 나타나는 경향을 보였으며 저층수의 Chlorophyll-a 농도는 오히려 하계에 낮게 나타났다. 이와 같이 표층과 저층간의 Chlorophyll-a 농도 차이가 크게 나타나는 것은 하계의 성층현상에 기인할 뿐만 아니라 영양염이 풍부하고 태양광의 강도가 큰 표층에서는 광합성 활동이 활발하여 식물플랑크톤이 대량으로 증식하지만, 태양광이 도달하지 못하거나 미약한 저층에서는 광합성 활동이 거의 없어서 식물플랑크톤의 증식이 미약하기 때문으로 판단된다(김[1997b]). 그러나 성층현상이 없거나 미약하여 연직혼합이 가능한 춘계, 추계 및 동계에는 Chlorophyll-a에 대한 표층수와 저층수 간의 농

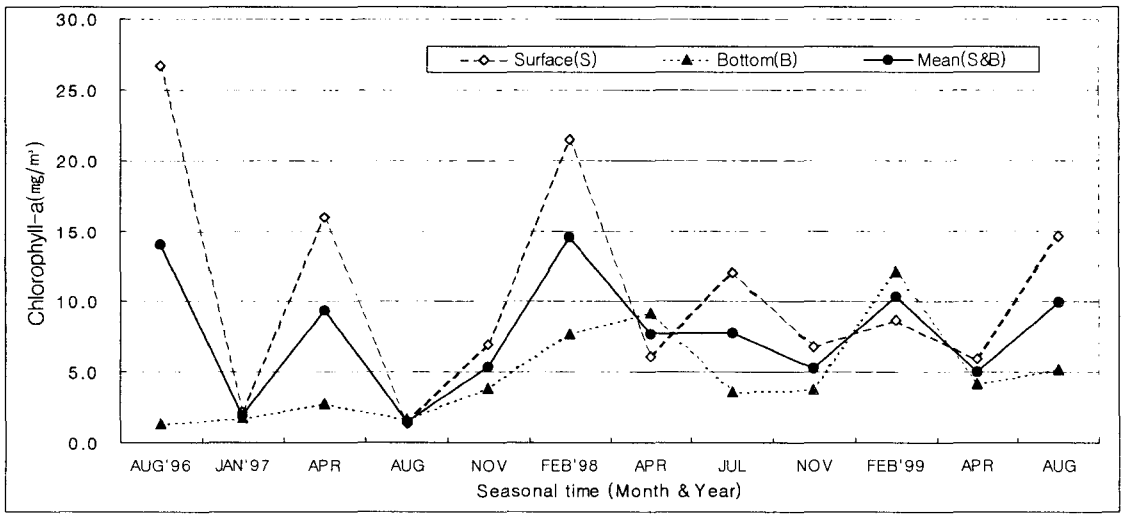

Fig. 6 Seasonal variations of mean chlorophyll-a in the entire Mokpo harbour for 3 years (1996 to 1999).

도 차이가 크지 않았다. 이와 같이 Chlorophyll-a 농도의 시·공간적 분포는 수온·염분과 관련된 성층현상, 일사량과 관련된 식물플랑크톤의 광합성 활동, 식물플랑크톤의 영양염 섭취와 수중의 영양염 농도 등과 관계가 있다.

일반적으로 식물플랑크톤 생체에 존재하는 질소와 인의 원자비(N/P), 즉 Redfield ratio는 16이지만, 목포항 해수중에 존재하는 용존무기질소와 인산인의 원자비(N/P)가 모든 계절에 있어서 16을 훨씬 상회하고 있다. 그래서 목포항 해수 중에서 식물플랑크톤의 성장에 대한 영양염의 제한인자는 燐(P)으로 판단된다(한국해양연구소[1983]). 그런데 97년 1월에는 용존무기질소와 인산인의 원자비(N/P)는 16보다 작은 값을 보였으며, 이 때의 식물플랑크톤 성장의 제한인자로 작용한 용존무기질소는 다른 계절에 비하여 낮은 값을 보인 반면에 인산인은 비교적 큰 값을 보였다. 또한 98년 7월에도 식물플랑크톤 성장의 제한인자가 질소였으며 이 때의 인산인 농도는 다른 시기보다 훨씬 높은 값을 보였다. 그러나 97년 1월과 98년 7월을 제외한 모든 계절에 있어서 용존무기질소와 인산인의 원자비(N/P)가 16을 훨씬 상회하고 있기 때문에 목포항에서 식물플랑크톤의 성장에 대한 영양염의 제한 인자는 窒素(N)라기 보다는 燐(P)으로 평가된다.

(6) 영양 상태의 평가

부영양화와 관련된 수질 항목으로서 투명도, 용존무기질소, 인산인 및 Chlorophyll-a를 선정하여 OECD의 영양단계 분류 기준을 적용한 결과, 4계절에 걸쳐서 중영양~부영양 상태이며, 특히 하계에 있어서 목포항 해수는 부영영 상태로 평가되었다.

3.2 오염지수 및 부영양도

목포항의 수질 자료를 기초로 하여 Nemerow [1991]가 제안한 (1)식으로 산정한 부영양화에 의한 오염지수(PIe)와 岡市[1972]가 제안한 (2)식으로 산정한 부영양도(EI)의 계절별·수층별 결과를 Table 3에 제시하였다.

3.2.1 부영양화에 의한 오염지수(PIe)

Table 3과 Fig. 7에 제시한 바와 같이, 부영양화에 의한 오염지수(PIe)를 살펴보면, 목포항 전역의 평균 오염지수가 춘계의 경우는 표층과 저층에서 각각 3.45~4.14와 3.45~4.24, 하계의 경우는 표층과 저층에서 각각 5.60~10.60과 3.85~8.65, 추계의 경우는 표층과 저층에서 각각 3.68~5.38과 3.32~5.60, 동계의 경우는 표층과 저층에서 각각 2.28~4.10과 3.16~4.28로 나타나서 모든 계절에 걸쳐서 목포항의 모든 수층에서 전반적으로 3등급 기준의 4.0을 초과하거나 겨우 만족하였다. 특히 부영양화에 의한 오염지수가 다른 계절에 비하여 전반적으로 하계에 높은 값을 보임으로써 부영양화에 의한 오염은 하계에 심각한 것으로 나타났다. 그래서 다른 계절에 비하여 하계에 식물플랑크톤이 증가함과 동시에 투명도는 감소하는 경향을 보였다. 특히 97년 8월의 투명도가 증가한 것은 백중사리 기간에 수질조사를 실시하였기 때문인데, 이 때의 COD와 Chlorophyll-a 농도가 다른 계절에 비하여 낮은 값을 보였다. 이것은 백중사리에 의한 목포항 해수 교

Table 3 Seasonal variations of pollution index by eutrophication(PIe) and eutrophication index(EI) for surface and bottom layers of the entire Mokpo Harbour from Aug. 1996 to Aug. 1999

Items \ Season		Year	1996	1997				1998				1999		
		Month	Aug.	Jan.	Apr.	Aug.	Nov.	Feb.	Apr.	Jul.	Nov.	Feb.	Apr.	Aug.
PIe	Surface (S)		10.60	4.10	3.62	6.28	3.68	4.01	4.14	5.60	5.38	2.28	3.45	9.05
	Bottom (B)		4.62	3.68	3.45	6.07	3.32	4.28	3.76	8.65	5.60	3.16	4.24	3.85
	Mean(S & B)		7.61	3.89	3.54	6.18	3.50	4.15	3.95	7.13	5.49	2.72	3.85	6.45
EI	Surface (S)		17.62	8.60	3.27	8.87	5.93	4.85	5.14	9.59	9.38	9.38	2.86	16.08
	Bottom (B)		11.30	6.65	6.87	2.00	5.50	7.89	3.25	17.88	17.88	10.54	2.70	6.20
	Mean(S & B)		14.46	7.63	5.07	5.44	5.72	6.37	4.20	13.74	13.63	9.96	2.78	11.14

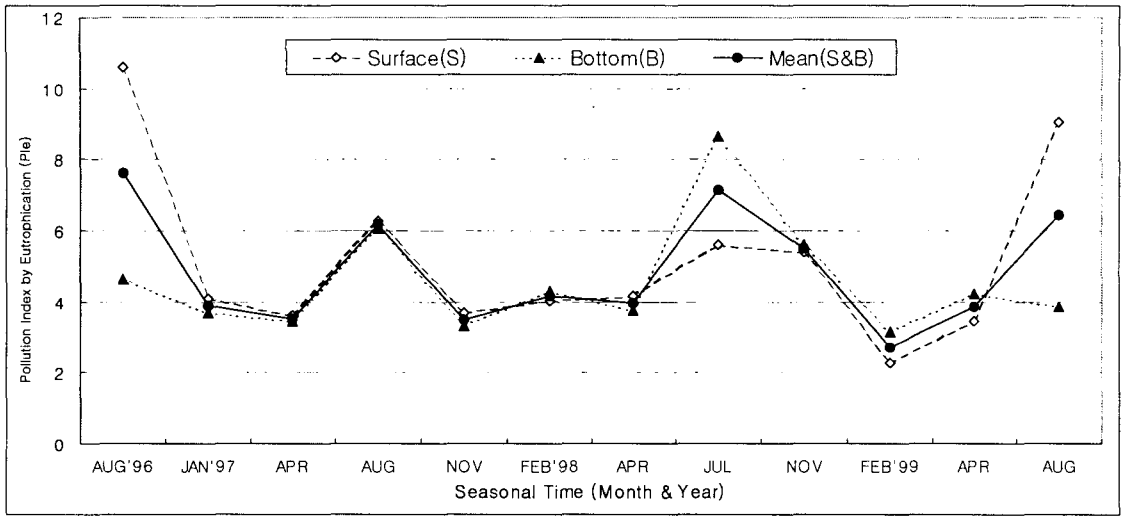

Fig. 7 Seasonal variations of mean pollution index by eutrophication(PIe) in the entire Mokpo harbour for 3 years from 1996 to 1999.

환량 증가가 목포항 수질의 자연정화에 크게 기여하고 있음을 암시하였다. 그러나 97년 8월에 있어서 용존무기질소와 인산인과 같은 식물영양염류는 다른 시기에 비하여 높은 값을 보였으며 이러한 현상은 식물플랑크톤 양의 감소로 인하여 수중으로부터 영양염 섭취량이 감소함으로써 수중의 영양염 농도가 높게 나타나는 것으로 해석된다. 4계절에 대한 목포항의 평균 오염지수는 2.3~10.6의 범위로서 폐기물 배출 해역인 한반도 서해 중부해역의 오염지수 2.3~10.1(김[1996])과 유사한 값을 보임으로써 3등급에도 미달하는 등급외의 수질을 나타내기도 하였다. 이것은 화학적 산소요구량(COD)만을 수질오염지표로 이용하여 평가한 결과인 2~3등급과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다(박[1994]). 따라서 부영양화에 의한 오염지수를 기준으로 평가하면, 목포항은 부영양화가 진행중인 해역이며, 특히 하계에는 부영양화가 상당히 진행된 오염된 해역으로 평가되었다. 또한 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에도 목포항의 부영양화에 의한 오염지수가 개선되는 징후는 나타나지 않았다.

3.2.2 부영양도(EI)

Table 3과 Fig. 8에 제시한 바와 같이, 부영양도(EI)를 살펴보면, 목포항 전역의 평균 부영양도가 춘계의 경우는 표층과 저층에서 각각 2.86~5.14와 2.70~6.87, 하계의 경우는 표층과 저층에서 각각 8.87~17.62과 2.00~17.88, 추계의 경우는 표층과 저층에서 각각 5.93~9.38과 5.50~17.88, 동계의 경우는 표층과 저층에서 각각 4.85~9.38과 6.65~10.54로 나타나서 모든 계절에 걸쳐서 목포항의 모든 수층에서 적조 발생 가능 기준치인 1.0을 훨씬 초과하였다. 이러한 결과는 폐기물 배출 해역인 한반도 서해의 중부 해역에 대한 부영양도 1.7~52.2(김[1996])와 적조가 자주 발생하는 마산만의 4.4~18.1(김[1994])과 유사하였다. 특히 하계와 추계의 부영양도가 동계와 춘계보다 높은 값을 보였다. 따라서 부영양도를 기준으로 평가하면, 목포항의 수질은 부영양화가 상당히 진행된 해역으로서 하계~추계에는 적조가 발생할 수 있는 잠재력이 대단히 크다. 또한 목포남해하수종말처리장의 가동이 시작된 1998년 8월 이후에도 목포항의 부영양도가 개선되는 징후는 나타나지 않았다.

4. 결 론

1996년 8월부터 1999년 8월까지 3년간 목포항에 대하여 조사하고 분석하여 얻은 수질 자료를 기

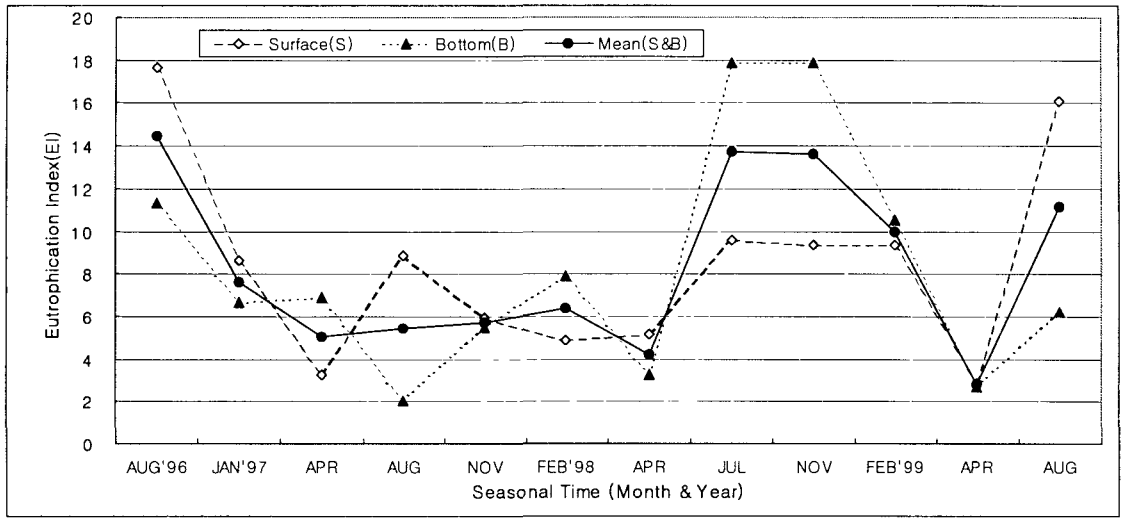

Fig. 8 Seasonal variations of mean eutrophication index(EI) in the entire Mokpo harbour for 3 years from 1996 to 1999.

초로 OECD의 영양상태 분류 기준을 적용하고, 부영양화에 의한 오염지수 및 부영양도를 산정함으로써 목포항의 수질과 부영양도의 계절 변화를 살펴본 결과는 다음과 같다.

1. 부영양화와 관련된 수질 항목으로서 투명도, 용존무기질소, 인산인, Chlorophyll-a를 선정하여 OECD의 영양단계 분류 기준을 적용한 결과, 목포항 해수는 4계절에 걸쳐서 중영양~부영양 상태이며, 특히 하계에는 부영양 상태로 평가되었다.

2. 부영양화에 의한 오염지수를 기준으로 평가하면, 목포항의 수질은 4계절에 걸쳐서 부영양화가 진행되고 있는 해역이며, 특히 하계에는 부영양화가 심화된 오염 해역으로서 3급수에도 미달되는 등급외의 수질이었으며, 화학적 산소요구량(COD)만을 해양수질오염지표로 이용하여 평가한 2~3등급의 수질과 상당한 차이가 있었다.

3. 부영양도를 기준으로 평가하면, 목포항의 수질은 4계절에 걸쳐서 적조가 발생할 수 있는 영양상태이며, 특히 하계~추계에는 적조가 발생할 수 있는 잠재력이 대단히 크다.

4. 목포항에서 부영양화에 따른 적조 발생을 억제하기 위해서는 식물플랑크톤의 증식에 필요한 질소와 인과 같은 영양염류의 유입을 제어할 필요가 있다. 목포항에서 식물플랑크톤 증식에 대한 영양염류 제한 인자는 질소(窒素)라기 보다는 인(燐)으로 평가되었다.

참고 문헌

[1] 국립수산진흥원, 1996, "한국연안어장환경오염조사 결과 보고서", 115~119.

[2] 김광수, 1996, "한반도 서해 해역의 하계 수질평가", 목포해양대학교논문집, 4(2), 103~114.

[3] 김광수, 1997a, "목포항의 수질 특성(Ⅰ) - 하계의 유기물 오염과 용존산소를 중심으로 -", 해양안전학회지 제3권 제1호, 99~109, .

[4] 김광수, 1997b, "목포항의 수질 특성(Ⅱ) - 하계의 부영양화를 중심으로 -", 해양안전학회지 제3권 제2호, 56~61.

[5] 김광수, 1999, "목포항 수질의 계절적 변화 특성 - 1. 물리 환경과 유기 오염", 해양환경·안전학회지, 제5권 제2호, 57~65.

[6] 김광수, 2000, "목포하수처리장 가동에 따른 목포항 유입 오염부하량의 변화", 2000년도 한국해양환경공학회 춘계학술대회논문집. 189~193.

[7] 김종구, 1994, "진해만 해역의 하계 부영양화 모델링", 부산수산대학교 공학박사학위논문, pp. 130.

[8] 박원규, 1994, "우리나라 해양오염방지를 위한 과제", 해양오염방지를 위한 정책 대토론회, 삼성지구환경연구소, 25~42.
[9] 이남일 · 김광수, 1998, "목포항에 유입하는 오염부하 산정 - 비강우시 육상오염부하를 중심으로" 1998년 한국해양환경공학회 추계학술대회논문집. 53~60.
[10] 이중우 · 정명선, 1991, "목포항 개발 및 대불산업단지 조성에 따른 연안해역 변화(Ⅰ) : 해면 정온도를 중심으로", 한국항해학회지 제15권 제2호, 87~96.
[11] 이중우 · 정명선 · 민병언, 1992, "목포항 개발 및 대불산업단지 조성에 따른 연안해역 변화(Ⅱ) : 해상환경을 중심으로", 한국항해학회지 제16권 제1호, 37~64.
[12] 임현식 · 박경양, 1998, "영산강 하구역의 연성저질에 서식하는 저서동물 군집", 한국수산학회지, 31(30), 330~352.
[13] 조영길 · 박경양, 1998, "영산강 하구 표층 퇴적물의 중금속 함량과 분포", 한국환경과학회지, 7(4), 549~557.
[14] 조현서 · 유영석 · 이규형, 1994, "가막만 수질 및 저질 환경의 계절별 변동 특성", 여수수산대학교 수산과학연구소 연구보고 제3권, 21~33.
[15] 정명선, 1992, "목포 연안역 개발에 따른 연안수역 변화에 관한 연구", 한국해양대학교 공학박사학위논문, pp. 124.
[16] 한국해양연구소, 1983, "적조 및 오염 모니터링 연구", BSPE00048-80-7.
[17] Nemerow N. L., 1991, "Stream, lake, estuary and ocean pollution", 2nd Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 271~286.
[18] Vollenweider, R.A. and J.J.Kerekes, 1982, "Eutrophication of waters", Monitoring, Assessment and Control, OECD, Paris.
[19] Strickland, J. D. and T. R. Parsons, 1972, "A practical handbook of seawater analysis", 2nd Ed..
[20] You S. J., J. G. Kim and G. S. Kim, 1994, "Water Quality of the Yellow Sea in Summer", Bull. Kor. Fish. Soc. 27(6), 825~835.
[21] 岡市友利, 1972, "內灣赤潮の發生機構 - Ⅲ 淺海の汚染と赤潮の發生", 水産研究叢書 23, 日本水産資源保護協會 : 58-76.
[22] 日本分析化學會北海道支部, 1981, "水の分析(第3版)", (株)化學同人, pp. 501