

# 해양수질 평가를 위한 식물플랑크톤 오염지표종 및 유기오염도 지수 개발에 대한 연구

양 대 영<sup>1)</sup>, 노 일<sup>2)</sup>

## Development of Phytoplankton Indicator Species and Organic Pollution Index for Seawater Quality Assessment

*Dae Young Yang , Il Noh*

### Abstract

Phytoplankton(dinoflagellates) as an indicator species group for marine pollution which frequently occurred in polluted coastal waters were selected and Organic Pollution Index(OPI) was developed to assess seawater quality. And these were applied at the waters in Haengam Bay, Masan Bay, Suyong Bay and Pusan Harbor.

Dinoflagellates selected were 9 species in 6 genera : *Prorocentrum sp.*, *Prorocentrum triestinum*, *Prorocentrum minimum*, *Gymnodinium sp.*, *Prorocentrum micans*, *Ceratium furca*, *Gonyaulax sp.*, *Heterocapsa triquetra* and *Heterosigma akashiwo*.

The distribution of Organic Pollution Index(OPI) in Suyong Bay, July and October 1995, was -1.47~2.07, which is comparable to the range of  $\beta, \alpha$ -Mesosaprobic according to the Saprobic System by Kolkwitz and Karsson(1902). At Pusan Harbor in September, 1995, the OPI value ranged from 1.75 to 3.12. At the entrance of Dong-Chon(st. 6) of Pusan Harbor, OPI was especially high(3.12) so as to reach hypertrophic state comparable to polysaprobic by Kolkwitz and Karson(1902). And I concluded that *Ceratium furca* is a marine pollution indicator species at this area. At Haengam Bay in October, 1995, the OPI value ranged from 0.74 to 1.56, the water quality of  $\beta$ -Mesosaprobic. Average OPI value at Masan Bay was 2.76, representing the fact that Masan Bay is being severely polluted, and the indicator species for marine pollution in this area seemed to be 3 dinoflagellate species, *Prorocentrum triestinum*, *Prorocentrum minimum* and *Ceratium furca*.

1 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 해양환경 전공  
2 한국해양대학교 해양환경공학과 교수

## I. 서론

만 내에서 식물플랑크톤은 환경변화에 순응하는 미세 조류로서, 증식에 알맞은 환경이 조성될 때 급속히 번식하는 생물(김 등, 1993)로, 수괴의 오염도를 판정하는데 좋은 재료(심 등, 1978)가 될 수 있다. 일반적으로 식물플랑크톤을 사용하여 오염도를 판정한 연구에는 종다양도 등을 이용한 군집 구조와 종조성 변화에 따른 수치적인 판정(McCormick, 1975; 심 등, 1978)이 있지만 식물플랑크톤 오염지표종 개발에 대한 본격적이며 종합적인 연구는 국내에서 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구는 식물 플랑크톤을 직접 이용하여 해역의 오염 정도를 판정하는 기술 개발에 목적을 두었다. 한편 현재까지 국내의 내만이나 연안에서 연구 결과를 토대로 각각의 오염수역(연안)에서 상습적으로 출현하는 식물플랑크톤(외편모조류)을 선별하고, 이들 식물플랑크톤의 출현 해역의 수질 특성을 포괄적으로 나타내는 유기오염도 지수를 개발하여 본 논문의 연구 해역인 마산만, 행암만 그리고 부산만등에 적용하여 조사해역의 오염도를 판정하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 조사 해역 및 시기

본 연구의 조사 해역은 마산 및 행암만, 부산항과 수영만으로 각 해역의 조사 정점은 수영만은 10개(Fig. 1), 부산항은 6개(Fig. 2) 그리고 마산 및 행암만은 12개 (Fig. 3)가 각각 선정되었다.

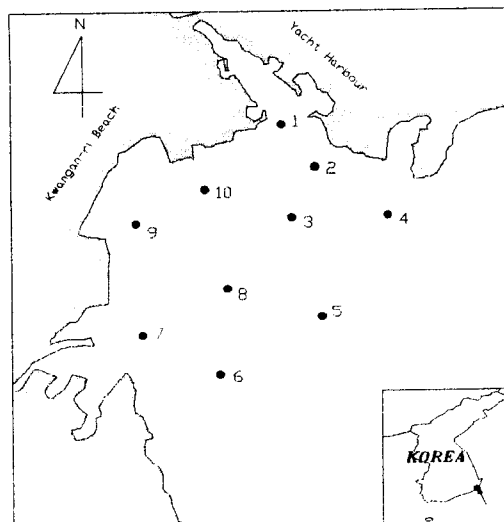


Fig. 1. Study sites in Suyong Bay, July and October 1995

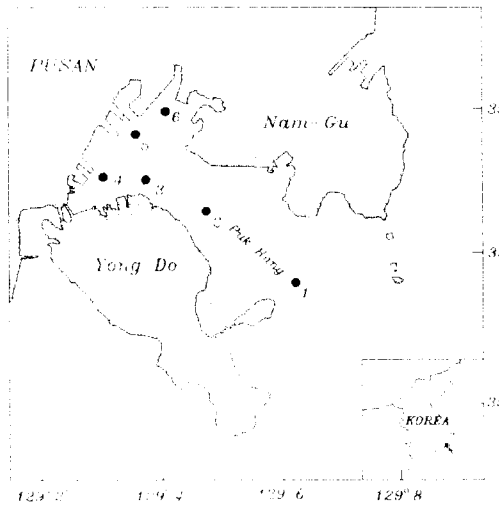


Fig. 2. Study sites in Pusan Harbor, September, 1995

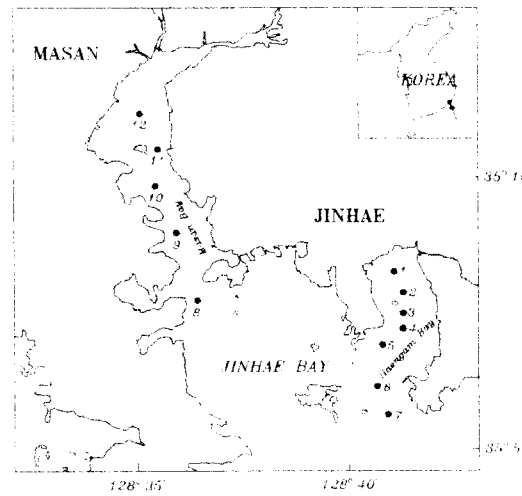


Fig. 3. Study sites in Haengam Bay and Masan Bay, October, 1995.

## 2. 분석항목 및 분석방법

화학적 산소요구량은 있는 과망간산칼륨법에 의하여 구하였고, 아질산성 질소( $\text{NO}_2\text{-N}$ )는 시료에 Sulfanilamide법으로 540nm에서 측정하였다. 암모니아성 질소( $\text{NH}_3\text{-N}$ )는 Indophenol법으로서, 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 자외선 흡광광도법으로서 측정하였고, 용존성 무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen)는 상기 아질산성 질소, 암모니아성 질소와 질산성 질소의 합으로 나타냈다. 인산염 인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 염화제일주석 환원법으로서 여과한 시료 적당량에 폴리브덴산암모늄과 염화제일주석용액을 넣어 690nm에서 흡광도를 측정하였다.

식물플랑크톤의 세포수 및 동정은 표층수를 van Dorn 채수기를 사용하여 1ℓ씩 채수하여 채수한 시료는 선상에서 중성 formalin원액(40%)으로 최종 농도 4%가 되도록 고정 한 후 실험실로 운반하여 시료를 균일하게 섞은 후 pipette으로 1ml를 취하여 Sedgewick-Rafter Chamber에 넣어 광학 현미경 150배 하에서 세포수를 계수 하였고, 종의 동정은 Simonsen(1974) 및 Parke and Dixon(1976)의 분류체계를 따라 400~1500배 하에서 동정하였다.

연안해역의 부영양도를 평가하는 여러가지 방법중 剛市(1972)는 적조를 유발하는 영양염의 농도를 고려하여 부영양도를 판정하였는데, 초기 적조 발생시 규조류의 세포수 1,000 cells/ml를 한계로 해서 규조류에 포함된 탄소량 0.83 mg/l (COD = 1mg/l)를 기준으로 용존부기질소 7.14 $\mu\text{g-at/l}$ , 인산염 인은 0.48 $\mu\text{g-at/l}$ 를 아래의 부영양도 지수식(Trophic State Index)에 대입한 값으로, 이때의 값을 부영양도 1로 평가하였다(국립수산진흥원, 1994).

일반적으로 오염된 해역(만)이라 할지라도 수온이 낮은 계절인 겨울철에는 오염의 현상이 뚜렷하지 않고, 수온이 높은 계절인 여름철에 담수유입과 고온에 영양염 및 유기물

의 유입의 증가, 수괴내 활발한 화학적 반응과 작은 미생물로부터 대형 생물들에 이르기 까지 활발한 생물활동에 의해 그 오염현상이 뚜렷하다(김, 1989; 국립환경연구원, 1991). 유기오염 지표종의 선정은 이러한 해역을 대상으로 하였으며, 출현한 식물플랑크톤 가운데 우선적으로 출현시기에 우점한 와편모조류(Dinoflagellate)를 선별하여 오염지표종의 대상으로 하였다. 그러나 오염 지표종을 실제 해역에 적용하여 오염도를 평가할 때 선정된 수질오염 지표종 의 출현 해역의 오염도 범위가 광범위함으로 정확한 오염상태를 말할

$$\text{부영양도지수(TSI)} = \frac{\text{COD}(\text{mg/l}) \times \text{DIN}(\text{ug-at/l}) \times \text{PO}_4\text{-P}(\text{ug-at/l})}{3.43}$$

DIN( $\mu\text{g-at/l}$ ) : Dissolved Inorganic Nitrogen

수 없게 된다. 따라서 해역의 오염도를 보다 정확히 알 수 있도록 오염정도를 정량화하여 수치적으로 표시하기 위하여 부영양 상태를 말해주는 부영양도 지수(Trophic State Index)에 유기오염에 관한 인자를 추가한 새로운 유기오염도 지수(Organic Pollution Index)를 개발하였다.

유기오염도지수(Organic Pollution Index)

$$= \log_{10} \left( \frac{(\text{COD}(\text{mg/l}))^2 \times \text{DIN}(\text{ug-at/l}) \times \text{PO}_4\text{-P}(\text{ug-at/l}) \times D}{3.43 \times 100} \right)$$

D : Population densities(%) of dinoflagellates .

이와같이 유기오염도지수(OPI)는 식물플랑크톤 가운데 와편모조류의 상대뒸수를 곱해주고, 부영양도 지수와 비교하여 식가운데 유기오염물질을 지표하는 COD의 부하를 크게하여 log scale로 변형시켜 유기오염 부하량이 많은 해역을 구별하여 오염도를 판정하는 하나의 기준 지수로 이용하였으며, 오염된 해역에서 출현한 오염 지표로서 식물플랑크톤의 선별에 사용하였다.

#### 라. 유기오염 지표종 선정

유기오염 지표종은 환경특성과 식물플랑크톤에 관한 보고된 데이터(COD, DIN, PO-P, 식물플랑크톤현존량 및 백분율)를 이용하여 유기오염도 지수를 계산하였고, 출현하였던 우점종들 가운데 유기오염도 지수(OPI)가 높은 종을 선정하였다.

### Ⅲ. 결과 및 고찰

#### 1. 영양염류 및 화학적산소요구량

95년 7월 수영만에서 용존성무기질소의 농도는 7.38~133.34  $\mu\text{g-at}/\ell$ 의 분포를 보였고 정점별로는 수영천의 입구부인 정점 1, 2 와 3에서 타 정점보다 비교적 높은 농도를 보이는 것은 용존성무기질소 등의 영양염 유입원인 수영천에 인접해 있는 까닭이며, 남천동 앞 해역(정점 6) 과 동백섬 부근 해역(정점 4)에서는 낮았는데 아마도 이 해역이 외해수의 직접적인 영향을 받고있는 것으로 사료된다(이 등, 1995).

10월의 경우 평균 58.52  $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 7월보다 2배정도 높았고, 7월 관측시 농도가 10.69  $\mu\text{g-at}/\ell$  낮았던 정점 4에서 가장 높은 130.05  $\mu\text{g-at}/\ell$ 를 보여 오히려 용존성무기질소의 공급원으로 생각되는 수영천의 입구부인 정점 1보다도 30  $\mu\text{g-at}/\ell$  이상 높았다.

부두와 조선소 및 도심지 사이에 위치하여 오염부하가 적지 않은 부산항(95.9)에서는 6개 정점(Fig. 2)을 대상으로 측정한 결과, 용존성무기질소 농도가 20.71~56.43  $\mu\text{g-at}/\ell$  (평균 31.07  $\mu\text{g-at}/\ell$ )로 내만 깊숙히 동천입구에 가까울 수록 농도가 증가하였다.

부산항에 비해 좁고 긴 지형조건을 갖추어 해수 교환율이 낮은 마산만 및 함안만에서는 10월 용존성무기질소 농도가 56.56~119.16  $\mu\text{g-at}/\ell$ 의 분포를 보였으며, 평균 77.63  $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 부산항이나 수영만의 평균값들 보다 월등히 높은 값이었다.

95년 7월 수영만의 인산염-인은 용존성무기질소의 분포와 유사하였는데, 이때 비교적 외해수의 영향이 많은 정점 4와 6에서 0.39  $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 최저의 농도를 보였다. 특이한 것은 일반적으로 영양염의 농도가 가장 높다고 생각되는 수영천 입구 안쪽인 정점 1보다도 수영천 입구부인 정점 2에서 정점 1의 2배 이상이 높은 2.61  $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 가장 높았다.

10월에는 평균 0.82  $\mu\text{g-at}/\ell$ 으로 용존성무기질소와 다르게 7월에 비해 감소되었다. 해역별로는 정점 1에서 4까지는 비교적 일정하지만 정점 5에서 10까지는 변화 폭이 컸고, 가장 외해역인 정점 5에서 2.38  $\mu\text{g-at}/\ell$ 로 농도의 최대값을 보였다.

9월의 부산항의 경우는 0.52~3.52  $\mu\text{g-at}/\ell$  (평균 1.52  $\mu\text{g-at}/\ell$ )으로 적조 발생의 하한 농도의 3배 이상 높은 값이다. 이것은 인접 해역인 수영만의 7월과 10월보다 다소 높았고, 환경부의 1987~94년 동안 부산항의 연평균 농도 0.16~1.19  $\mu\text{g-at}/\ell$  보다도 높은 농도였지만, 박(1995)의 92년 겨울철의 0.90~2.322  $\text{mg}/\ell$  (평균 1.71  $\mu\text{g-at}/\ell$ ), 부산시(1990)의 평균 농도 1.4  $\mu\text{g-at}/\ell$  와 이(1984)의 0.51~

2.19  $\mu\text{g-at}/\ell$ 와는 많은 차이를 보이지 않았다.

마산만 및 행암만의 인산염-인의 농도 분포는 0.23~1.19  $\mu\text{g-at}/\ell$  (평균 0.67  $\mu\text{g-at}/\ell$ )였고 대체적으로 마산만과 행암만의 내해역에서 외해역으로 갈수록 인산염-인의 농도가 낮아지는 경향은 용존무기질소의 농도 분포와 유사하였다(Fig. 11). 전체 농도가 0.48  $\mu\text{g-at}/\ell$  이상으로 식물플랑크톤 대번식을 위한 최소 농도보다 다소 높은 농도였고, Riley and Chester(1971)가 보고한 바와 같이 인산염-인의 연안에서의 농도가 0.06~0.65  $\mu\text{g-at}/\ell$  보다도 다소 상회하는 것이었다.

수영만에서 7월 COD의 농도는 평균 4.073  $\text{mg}/\ell$ 로 정점 2와 10에서 가장 낮은 2.68  $\text{mg}/\ell$ 였고, 용존성무기질소와 인산염-인의 농도가 다소 낮았던 정점 7에서는 최대 농도로 6.02  $\text{mg}/\ell$ 였다(Fig. 4).

10월 수영만에서는 정점 2, 4를 제외하고 비교적 균일한 분포를 보였고(Fig. 5), 평균 4.95  $\text{mg}/\ell$ 를 보여 7월보다 다소 높았다. 가장 높은 해역은 유기물이 다량 유입되는 수영천 입구부인 정점 2와 동백섬 안쪽 해역에서 매립 토양으로부터 다량의 영양염 및 유기물질의 용출의 결과, COD의 가장 높은 농도를 보여준 정점 4로 각각 7.3과 8.0  $\text{mg}/\ell$ 이었다. 이러한 농도는 김 등(1993)의 6월 3.66  $\text{mg}/\ell$ 보다 다소 높은 값이었고, 강우로 강수 유입이 많이 있었던 8월 5.55  $\text{mg}/\ell$ (김 등, 1993)보다는 다소 낮은 값이었다.

수영만과 비슷한 농도를 보였던 부산항의 9월 농도는 평균 4.2  $\text{mg}/\ell$  (2.4~5.4  $\text{mg}/\ell$ )의 분포를 나타냈으며, 정점 1과 2에서 가장 높아 내만으로 갈수록 작아지며

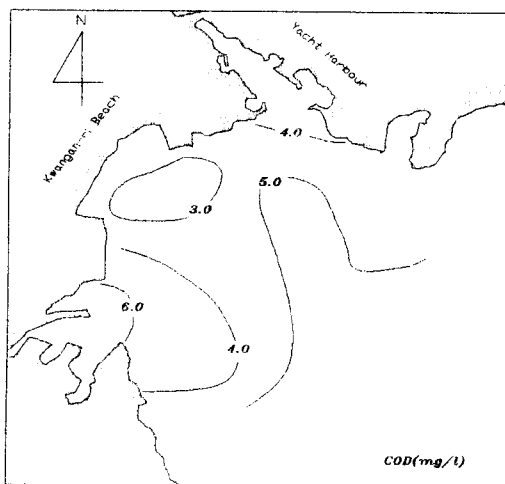


Fig. 4. Distribution of Chemical Oxygen Demand(COD,  $\text{mg}/\ell$ ) of surface waters in Suyong Bay, July 1995

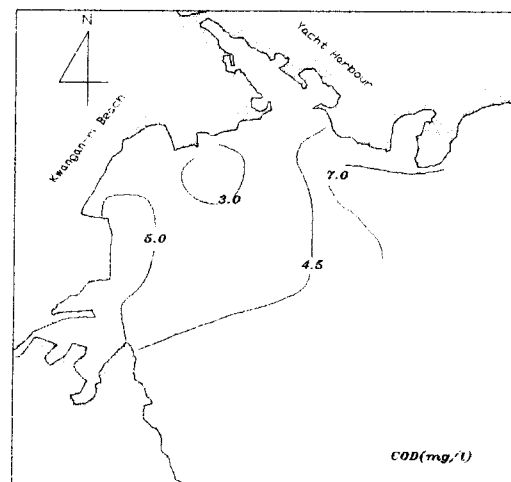


Fig. 5. Distribution of Chemical Oxygen Demand(COD,  $\text{mg}/\ell$ ) of surface waters in Suyong Bay, October 1995

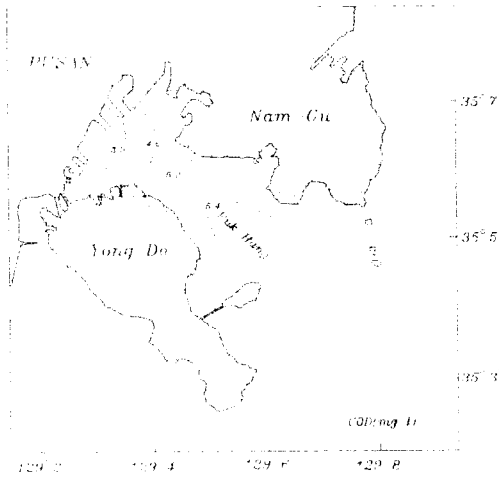


Fig. 6. Distribution of Chemical Oxygen Demand(COD, mg/ℓ) of surface waters in Pusan Harbor, September 1995

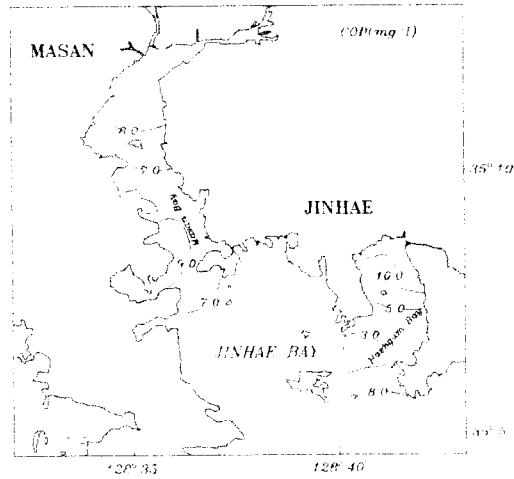


Fig. 7. Distribution of Chemical Oxygen Demand(COD, mg/ℓ) of surface waters in Masan and Haengam Bay, October 1995

정점 5에서 최소값을 보이다가 다시 동천입구인 정점 6에서 다시 높아졌다(Fig. 6).

10월 마산만 및 행암만은 평균 7.06 mg/ℓ로서 영양염류(DIN, PO<sub>4</sub>-P)와 비슷한 분포양상을 보이며, 가장 농도가 높은 해역은 행암 내만인 정점 2(10.2 mg/ℓ)였고, 가장 낮은 지역은 행암만의 정점 6(3.2 mg/ℓ)이었다(Fig. 7). 만 외쪽 해역(정점 8, 9)보다 오히려 만 중앙부 내쪽 해역(정점 10, 11)에서 가장 낮은 농도를 보여 유기성 부유물질이 만내부에서 뿐만 아니라 만의 외부쪽에 위치한 덕동해역의 영향(김, 1989)인 것으로서 지금까지 연구되어온 마산내만에서 외만으로 갈수록 농도가 낮아졌던 보고들과는 다소의 차이를 보이고 있다(박, 1979; KORDI, 1980, 81, 82; 김, 1989; 마산시, 1994; 장, 1996).

## 2. 식물플랑크톤의 종조성 및 현존량

95년 7월 수영만에서 분류된 식물플랑크톤 군집의 조성은 규조류가 18속 56종 2변종에 이르러 가장 풍부하였으며, 이외 와편모조류는 6속 10종, 기타 황색편모조류 2속 3변종등으로 구성되었다.

10월(수영만) 출현 군집의 조성은 총 58종 3변종 1품종으로 규조류가 22속 41종 2변종 1품종으로 단연 우세하였으며 와편모조류도 8속 14종으로 7월에 비해 풍부하였고 7월에 출현하지 않았던 유글레나류도 1속 1종으로 출현하였다. 7월과 10월 수영만에서 이와 같은 결과는 김 등(1993)의 1월부터 8월 사이 규조류의 총 22속 출현에 비해 다소 풍부한 종 수를 보여준 것이다.

9월 부산항에서 출현한 식물플랑크톤의 군집 조성은 규조류가 5속 8종 1변종, 와편모조류가 11속 33종 과 유글레나류의 1속 1종으로 수영만(7,10월)보다 월등히 적은 출현 종수를 보이고 있다. 특히 와편모조류 군집이 출현종수의 76.7%로 특징적인 해역임을 보여준다. 이것은 Min(1977)의 규조류 군집의 종조성율이 와편모조류의 18.6%보다 상당히 높은 72.8%와는 대비되는 것으로 그 동안 부산항 수괴의 특성이 상당히 달라진 것이라 볼 수 있다.

마산만 및 행암만의 경우 총 29속 70종 2변종이 출현, 규조류가 40종 2변종 3품종으로 가장 풍부한 종수를 보였고, 와편모조류가 8속 21종, 황색편모조류 5속 3종 2변종 그리고 유글레나류의 1속 1종이 출현하였지만 마산만은 와편모조류가 전체 종수의 36.6%를 차지하여 행암만의 27.4%보다는 다소 높아 두 해역간에 군집 구조가 다르게 나타났다.

각 해역별 규조류의 점유율은 7월 수영만은 예년과 비슷하여 매우 높은 점유율을 보여주어 각 정점별 83~99%의 점유율을 나타냈고, 관측 정점들중 정점 5에서 83%를 점유한 것외에는 모든 정점들에서 90%이상의 점유율을 보여주었다. 최우점종은 *Chaetoceros curvistum*이었는데, 13.2~53.2%를 점유하였고 *Chaetoceros socialis*와 *Skeletonema costatum*도 각각 11.2%, 5.9% 점유하였다.

10월은 정점들간 다소 격차가 있어 총세포수가 가장 적었던 정점 3에서는 규조류가 100%의 점유율을 보였으며, 정점 2에서는 71.9%로 최소 조성율을 보였다. 7월과는 달리 최우점종은 *Chaetoceros debilis*로 평균 점유율이 23.5%였고, 7월에 다소 높은 점유율을 보였던 *Skeletonema costatum*도 16.0%로 높았다.

일부 해역에서 식물플랑크톤의 patch를 관찰할 수 있었던 9월 부산항은 규조류의 점유율이 0.0~4.1%로 수영만과 마산 및 행암만과 뚜렷한 차이를 보였다. 세포수에 있어서 0~20 cells/ml를 보였는데, 주요 출현종으로는 *Skeletonema costatum*이었지만 정점 1, 4 와 5에서는 출현하지 않았다.

마산만 및 행암만은 두 지역이 많은 차이를 보여 행암만은 규조류의 점유율이 91.0~98.6%인 반면, 마산만은 48.4~77.8%를 점유하였다. 행암만에서 규조류중 최우점종은 *Skeletonema costatum*으로 65.9~89.6%의 높은 점유율을 차지하였고 *Nitzschia closterium*과 *Nitzschia delicatissima*등도 우점군으로 출현하였다.

유기오염도 지수를 산정을 위한 와편모조류 조성율은 7월 수영만의 경우 0.3~16.0%로 정점 5에서 최대 조성율을 보였는데, 이때 *Ceratium furca*가 타 정점에 비해 다량 출현하였기 때문이며, 반대로 정점 6에서는 최소의 조성율을 보였다.

10월 수영만은 7월과 비슷한 수준으로 0.0~28.1%로 우점종으로 *Ceratium*



*furca*가 전체 평균 점유율 2.1% 출현하여 7월보다는 다소 낮은 값이었다. 이외 주요종으로 7월에 출현하였던 *Prorocentrum sp.*과 *Prorocentrum minimum*이 있다.

부산항의 경우 95.9~100%로 아주 높은 조성을 보였고 특히 정점 5에서는 규조류가 전혀 출현치 않았고, 관측시 적조현상을 보였던 정점 3에서는 와편모조류의 조성이 99.1%였다. 우점종으로는 일시적인 적조현상을 일으키며 연쇄상군체를 형성하는 *Cochlodinium sp.*와 7, 10월 수영만에서도 출현한 *Ceratium furca*등이었다.

행암만은 0.9~9.0%(평균 5.8%)으로 다소 낮았지만, 마산만(Fig. 7)은 14.0~49.2%(평균 38.34%)의 와편모조류 조성을 나타냈다. 정점별로는 행암만의 가장 안쪽해역(정점 1)에서 최소 조성을, 마산만 중앙부인 정점 10에서 최대 조성을 보여주었다. 마산만의 주요 출현종으로 *Prorocentrum triestinum*, *P. minimum*과 *Ceratium furca*등이 있고, 행암만에서도 *Ceratium furca*와 *Prorocentrum triestinum*등이 주요 출현종이었지만 *P. minimum*은 소량 출현하였다.

총세포수(cells/ml)는 정점별 격차가 심했던 7월 수영만에서 남천동 앞 해역(정점 8)에서 최대(5,700cells/ml)이며, 외만에서 내만으로 갈수록 총세포수의 급격한 감소현상이 뚜렷하였고, 가장 적은 세포수는 수영천 입구부의 정점 1(191 cells/ml)에서였다.

10월은 7월과 비교하여 해역간에 비슷한 현존량을 보였지만 총세포수에서는 월등히 적어 광안리 해수욕장 앞 해역인 정점 9에서 110 cells/ml로 가장 많았고, 21 cells/ml로 정점 3에서 가장 적었다. 이와 같은 식물플랑크톤의 소멸은 수온하강과 조도 감소에 하강에 따른 것이라 사료된다(유, 1980).

부산항(95.9)에서 총세포수의 분포특성은 121~2,714 cells/ml(평균 768 cells/ml)로 관측시 식물플랑크톤의 patch를 이루었던 북항 내만인 정점 3에서 최대 세포수를 보이지만, 보다 안쪽 해역인 정점 4에서는 급격히 감소하여 최소 세포수(121 cells/ml)를 보였다.

마산만, 행암만(95.10)의 총세포수는 356~8,328 cells/ml로 평균 2,168 cells/ml이었고, 행암만의 정점 2에서 최대(8,328cells/ml), 마산만의 정점 11(356cells/ml)에서 최소의 세포수가 관찰되었다. 마산만에 비해서 행암만이 약 8배 정도 세포수가 많았는데, 두 해역이 인접 해역임에도 플랑크톤의 서식환경이 서로 다름을 보여주는 것이다.

### 3. 유기 오염 지표종

유기오염지표종 선정결과(Table 1), 와편모조류 가운데 9종이 선별되었으며,

이들 종은 대부분 진해만 일대에서 출현하였는데, 출현해역에서 대발생(bloom)을 일으킨 종이나 발생종들의 우점종가운데 선별되었다.

종들가운데 유기오염도 지수가 가장 높은 종은 *Prorocentrum sp.*, *Prorocentrum triestinum*과 *Prorocentrum minimum*이며, 이때 외편모조류 조성

Table 1. Relationship between pollution indicators and trophic state index, dinoflagellate composition rate and organic pollution index in coastal waters, Korea.

| NO. | Dinoflagellate                 | TSI       | D(%)  | OPI         | Occured Area |
|-----|--------------------------------|-----------|-------|-------------|--------------|
| 1   | <i>Prorocentrum sp.</i>        | 860-360   | 79-46 | 3.77-2.98   | 마산만          |
| 2   | <i>Prorocentrum triestinum</i> | 1,250-230 | 99-80 | 3.69-2.93   | 마산내만         |
| 3   | <i>Prorocentrum minimum</i>    | 1,250-1.5 | 80-16 | 3.69-(-0.3) | 마산내만         |
| 4   | <i>Gymnodinium sp.</i>         | 900-1.36  | 56-16 | 3.67-(-0.3) | 행암만,<br>마산만  |
| 5   | <i>Prorocentrum micans</i>     | 1,020-15  | 96-20 | 3.48-0.3    | 마산내만         |
| 6   | <i>Ceratium furca</i>          | 690-9     | 92-80 | 3.17-1.48   | 마산내만         |
| 7   | <i>Gonyaulax sp.</i>           | 690-1     | 92-18 | 3.17-(-0.3) | 마산내만         |
| 8   | <i>Heterocapsa triquetra</i>   | 195-87    | 99.5  | 2.99-2.61   | 마산내만         |
| 9   | <i>Heterosigma akashiwo</i>    | 35-0.3    | 80-10 | 2.04-(-2)   | 마산만          |

율이 99~16%로 매우 높았으며, *Prorocentrum micans*의 경우도 유기오염도 지수가 3,040으로 매우 높은 값을 보일때 종합의 폐사율이 97.5%/120hrs(박, 1979)로 이와 비슷한 생물들이 더이상 서식할 수 없는 상태의 해역임을 시사해 주고 있다. 그래서 부영양도 지수(TSI)와 유기오염도 지수(OPI)가 가장 낮았던 종은 *Heterosigma akashiwo*였다(Table 1).

#### 4. 수질 계열에 따른 선별된 종의 특징

*Gymnodinium sp.*는 어패류에 피해를 줄 수 있는 독성분을 분비하고(KORDI, 1981), 유기오염도 지수가 3.67~ -0.3의 범위를 보여 해역별 해수의 수질 등급(해양오염 방지법 제 44조의 2)에 따르면 II등급의 수질해역( $\beta$ -중부수성)에서부터 강부수성(腐水性) 해역에 이르기까지 매우 광범위한 오염 범위에 출현하였다(Fig. 8).

*Prorocentrum sp.*은 *P. micans*, *P. minimum*, 과 *P. triestinum* 종의 복합적인 출현으로 유기오염지수가 2.98~3.77(Fig. 8)이고 부영양도 지수는 350~860이

었는데, 선정된 종 가운데 유기오염도 지수가 가장 높게 출현하여 이 종이 출현하는 지역이 마산만의 가장 안쪽해역으로 상당히 부수성 해역이었고(박, 1982), 김(1989)도 동일한 해역에서 *Prorocentrum sp.*가 매년 장기간 적조 현상의 최우점종으로 출현하였다고 기록하였다.

*Prorocentrum micans*도 *Gymnodinium sp.*와 마찬가지로 어패류에 악영향을 끼치는 독성물질을 분비하는 종으로 유기오염도 지수는 1.79이었고, 1981년도 8월에도 마산내만의 우점종으로 본 종이 출현하였는데, 이때 부영양도 지수가 212, 유기오염도 지수는 2.92로 아주 높았다. 본 종의 출현시 유기오염도 지수가 0.30~3.48의 범위로 출현해역의 오염도가 광범위하였지만 일반적으로 II등급( $\beta$ -Mesosaprobic) 이상의 해역에서만 출현하였다(Fig. 8).

*Gonyaulax sp.*의 COD의 최적조건은 1.50~4.72 mg/l(평균 2.99 mg/l)으로 COD농도가 대체로 다른 와편모조류에 비해 낮지만 규조류에 비해서는 높은 농

Table 2. Water quality criteria announced by Korea Ministry of Environment(1991) and Kolkwitz and Marsson System(1902)

| 등급 및<br>오수생물계          | 항목     | COD<br>(mg/l) | DIN<br>( $\mu\text{g-at/l}$ ) | PO <sub>4</sub> -P<br>( $\mu\text{g-at/l}$ ) | TSI  | OPI    | D(%) |
|------------------------|--------|---------------|-------------------------------|--|------|--------|------|
| Oligo-saprobic         | I 등급   | 1 이하          | 3.57                          | 0.24   | 0.24 | -0.6이하 | 100  |
| $\beta$ -              | II 등급  | 2 이하          | 7.14                          | 0.48   | 2.0  | 0.6이하  | 100  |
| Mesosaprobic           | III 등급 | 4 이하          | 14.3                          | 0.96   | 16.0 | 1.8이하  | 100  |
| $\alpha$ -Mesosaprobic |        | 6             | -                             | -  | -    | 2.0이하  | 100  |
| Polysaprobic           |        | 8             | -                             | -  | -    | 3.0이하  | 100  |
|                        |        | 10            | -                             | -  | -    | 3.0이상  | 100  |

- : no data

도이다(이 등, 1981). *Gymnodinium sp.*, *Prorocentrum micans* 와같이 독성물질을 분비하는 종으로서 유기오염도 지수는 -0.30~3.17(Fig. 8)로 *Prorocentrum micans*보다 상당히 낮게 나타났으나 부영양도 지수가 1~6.90로 이 종이 출현하였던 시기도 부영양화된 해역이었다.

*Ceratium furca*는 난수성으로 모든 바다에 분포하나 외양보다는 연안수역에 더 많이 분포하고(심 등, 1981), 출현해역에서 유기오염도 지수의 범위는 1.48~3.17(Fig. 8)로 *Gonyaulax*와 유사한 지역에서 출현하였고 부영양성 종으로 보고되었다(일본수산화회, 1982).

*Prorocentrum triestium*은 1981년 이후 매년 하계에 걸쳐 적조를 일으킨 종으로 9월에서 12월 사이에 출현하여 비교적 출현 시기와 범위가 광범위하였다(Lee et. al., 1990; 문 등, 1995).

12월과 4월 사이에 주로 우점하는(Lee *et. al.*, 1990; KORDI, 1981) *Heterocapsa triquetra*는 유기오염도 지수가 2.61~2.99(Fig. 8)로 91년과 93년 3월에 유기성 오염이 심했던 마산만 전역에 우점 출현하였다(마산시, 1994).

독성물질을 분비하는 *Prorocentrum minimum*은 KORDI(1980, 1981) 연구결과, 부영양도 지수와 유기오염도 지수가 80년도에는 36.4 와 2.16였으며, 1981년도에는 각각 23 과 1.85로 III등급이상( $\beta$ -중부수성) 해역에서 출현하였다.

*Heterosigma sp.*중 *Heterosigma akashiwo*는 선별된 종들가운데 유기오염도 지수가 가장 낮아 III등급( $\beta$ -중부수성)이하 I 등급(청정수역)에까지 출현하였고,

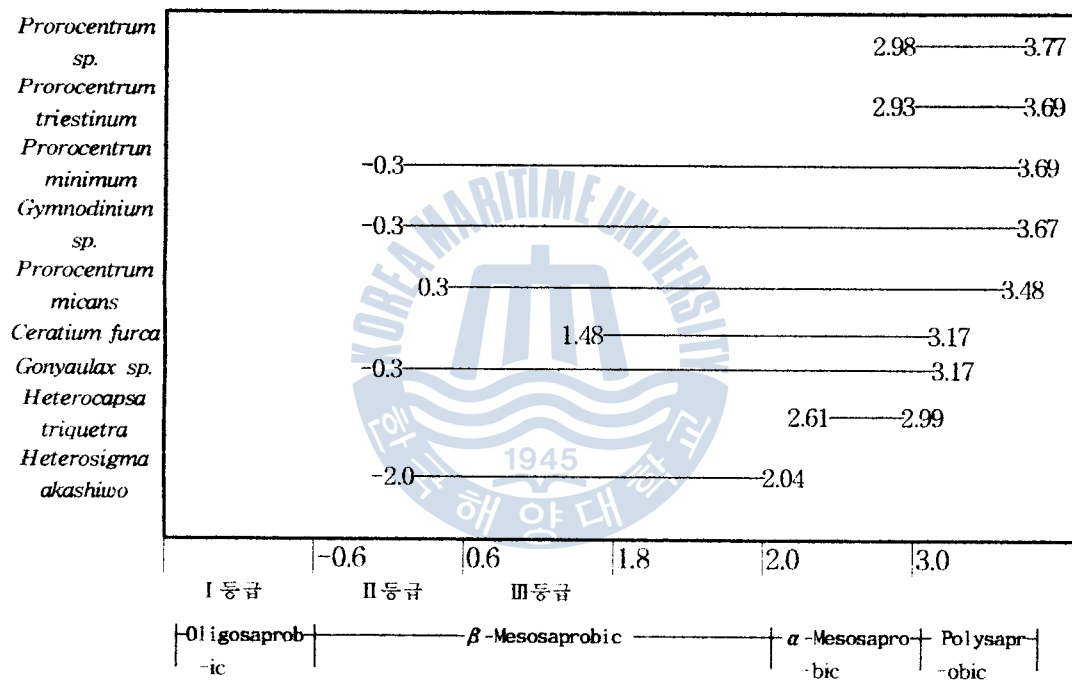


Fig. 8. Distribution diagram of each indicator species for seawater quality in coastal waters, Korea

유기오염도 지수가 -2.0~2.04(Fig. 8)로 와편모조류 점유율이 높은 해역에서 대체로 유기 오염도 지수가 높았다.

##### 5. 유기오염 지표종과 유기오염도 지수에 의한 수질 평가

본 연구해역을 대상으로 선정된 유기오염 지표종과 유기오염도 지수를 적용하여 수질 평가를 시도하였다.

1995년 7월 수영만 와편모조류의 전체 조성율이 평균 4.09%(0.3~16%)로 유

기오염도 지수는  $-1.47 \sim 1.68$ (평균 0.89)의 범위로 정점별 심한 차이가 있었다. 유기오염도 지수에 의한 수질평가 결과, 95년 7월 수영만 해역의 수질은 대부분 수역이  $\beta$ -중부수성 해역(III등급이하)으로서 다소 오염된 상태였다. 한편, 이시기에 출현한 주된 유기오염 지표종은 *Ceratium furca*였다.

10월은 7월에 비해 다소 외편모조류 조성율이 높아 전 정점에서  $0.0 \sim 28.1\%$ (평균 10.9%)의 점유율을 보였고, 유기오염도 지수의 계산 결과  $0.91 \sim 2.07$ 로 7월에 비해 화연한 증가를 보였다. 이와같은 결과는 10월 수영만 해역이  $\beta$ -중부수성(III등급이하)  $\alpha$ -중부수성 해역으로서 7월 수질판정 결과보다는 다소 악화된 수질인 것으로 보인다. 출현한 유기오염 지표종은 7월과 유사한 *Ceratium furca*, *Prorocentrum* sp. 그리고 *Gymnodinium* sp 등이었다.

9월 부산항의 경우 외편모조류의 조성율은  $95.9 \sim 100\%$ 로 아주 높았으며, 주요 유기오염 지표종으로는 강한 오염수역에서 출현하는 *Ceratium furca*였고 예외적으로 *Cochlodinium* sp. 와 *Peridinium trichoideum*이 우점 출현하였다. 우점종들중 *Ceratium furca*의 우점 출현은 부산항 해역이  $\beta$ -중부수성에서  $\alpha$ -중부수성 해역임을 보여주는 것이다. 부산항의 수질은  $\beta$ -중부수성(III등급 이하)으로부터 강부수성에 가까운  $\alpha$ -중부수성 해역이었다(Fig.11).

해암만을 외편모조류의 조성율이 평균 3%로 조성율이 매우 낮기 때문에 수영만이나 부산항에 비해 높은 (20)일에도 불구하고 유기오염도 지수 범위가 0.91~1.91(평균 1.37) 수준이었다. 유기오염도 지수에 의한 수질 판정 결과 10월 해암만을  $\beta$ -중부수성 해역이었다.

부산만을 부산항이나 해암만의 경우와 유사하게 관측 정점들 가운데 가장 오염된 정점은 관해역 가장 높은 유기오염도를 보였다. 본 연구시기의 타 해역의 수질, 부산항에서 외편모조류 가운데 주요 우점종이 *Ceratium furca*였지만 부산만의 우점종은 *Prorocentrum cristatum*인 것이 특이할 만한 것이었다. 부산만의 수질은  $\beta$ -중부수성 해역에서 강부수성 해역을 보임으로서 수질상태가 악화되었는데, 이것은 본 해역이 관 폐쇄성 만이고 여기에 유입되는 오염물질의 양이 과다하여 만 전체가 이미 오염된 상태임을 입증해 주는 것이다.

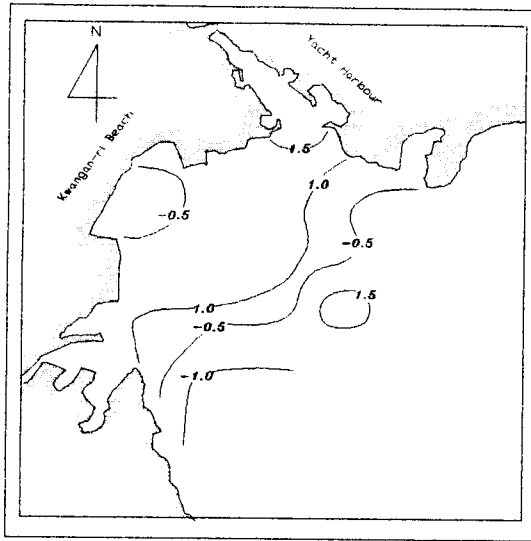


Fig. 9. Marine environmental quality by the Organic Pollution Index in Suyong Bay, June 1995

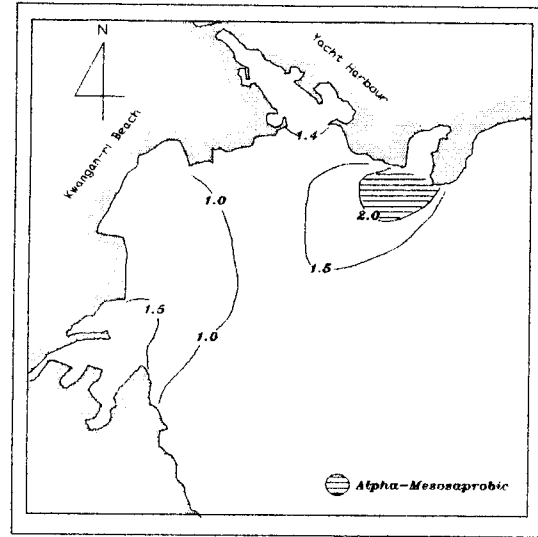


Fig.10. Marine environmental quality by the Organic Pollution Index in Suyong Bay, October 1995

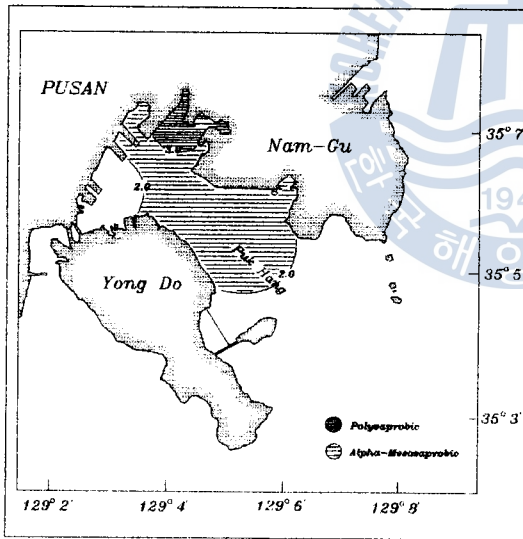


Fig.11. Marine environmental quality by the Organic Pollution Index in Pusan Harbor, September 1995

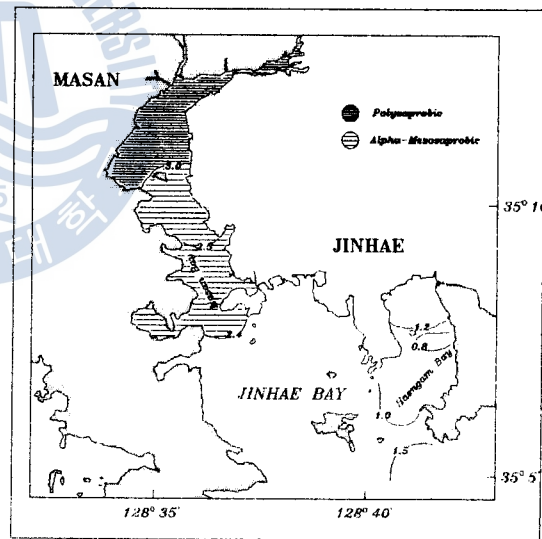


Fig.12. Marine environmental quality by the Organic Pollution Index in Masan and Haengam Bay, October 1995

#### IV. 요약 및 결론

연안 해역의 오염도를 평가하기 위하여 지금까지 보고된 자료를 이용하여 유기 오염이 심한 지역에서 상습적으로 출현하는 식물플랑크톤(와편모조류)을 선별하였고, 이들 식물플랑크톤이 발생한 해역의 수질을 보다 정확하고 포괄적으로 나

타내기 위해 유기오염도 지수(Organic Pollution Index)를 개발하여 마산만 및 행암만, 부산항 그리고 수영만의 수질 평가에 적용하였다.

유기오염 지표종으로 선정된 와편모조류는 총 6속 9종으로 *Prorocentrum* sp., *Prorocentrum triestinum*, *Prorocentrum minimum*, *Gymnodinium* sp., *Prorocentrum micans*, *Ceratium furca*, *Gonyaulax* sp., *Heterocapsa triquetra* 그리고 *Heterosigma akashiwo* 등 이었다.

수영만에서 7월 유기오염 지표종(와편모조류)의 우점 출현은 나타나지 않았으며 유기오염도 지수(OPI)가 -1.47~1.68로 정점별 심한 격차가 있었다. 특히 이기대 인접 해역과 광안리 해수욕장 부근 해역이 청정 수역이었으며, 이외 전 해역이  $\beta$ -중부수성 수역의 수질을 보였다.

부산항(9월)은 와편모조류의 점유율이 상당히 높은 95.9~100%로서 우점종으로는 *Cochlodinium* sp, *Peridinium trochoideum*과 *Ceratium furca* 등이었다. 유기오염도 지수가 1.75~3.12로 정점별 격차가 심하였고, 동천 입구 부근 정점 6에서 가장 높아 강부수성에 가까운 수질 특성을 나타내었다.

행암만은 높은 COD, DIN 그리고  $PO_4$ -P임에도 불구하고 전체적으로  $\beta$ -중부수성 수역의 특징을 보였는데, 이것은 와편모조류의 조성율이 극히 낮아 상대적으로 유기오염도 지수의 값을 낮추게 하였기 때문이었다.

마산만은 평균 유기오염도 지수가 가장 높은 해역(OPI=2.76)으로 나타났는데 이것은 만 전체가 반폐쇄성 해역으로서 유기 오염물질과 영양염의 과도한 유입으로 농축되어 있음을 보여주는 것이다. 특히 돌섬을 기준으로 내부 해역은 유기오염도 지수가 3.02로서 강부수성 해역이었고, 이외의 마산만 전 해역이  $\alpha$ -중부수성 해역이었다. 이때 출현한 유기오염 지표종으로는 *Prorocentrum triestinum*, *P. minimum*과 *Ceratium furca* 등 이었다.

본 연구에서 선정된 유기오염 지표종으로서 식물플랑크톤(와편모조류)과 개발된 유기오염도 지수를 연안 해역에서 적용한 결과 타 방법(저서생물을 이용한 수질 평가)으로 해역의 수질을 평가한 것과 비교할 때 대체로 잘 일치하였다. 하지만 유기오염 지표종을 선정시 마산만 및 일부 남해 연안을 대상으로 하였고 각 해역의 특징이 다르며 같은 종이라 할지라도 출현 지역에 따라 다소의 생리·생태학적인 성질이 다르므로 선정된 지표종을 광범위하게 사용하기에는 무리가 따를 것이고, 규조류 가운데 오염 지표종의 선정이 되지 않은 관계로 규조류의 우점 발생시 수질을 평가하는 문제가 발생된다. 따라서 앞으로 연구되어야 할 문제는 오염 지표종으로서 규조류의 개발이 시급히 되어야 하겠으며, 보다 광범위하게 수질오염도의 평가를 위해 각 종별 영양염 및 유기물의 부하에 따른 유기오염도 지수의 범위를 정확히 규명할 필요가 있겠다.

## 참고문헌

- 국립수산진흥원. 1994. 부영양화 및 적조현상 규명에 관한 연구. 제2차년도 연차보고서, p. 40-133
- 국립환경연구원. 1991. 생물학적 수질평가 기법연구 (2차년도). p. 93-97
- 김동원, 이원재. 1993. 해양미생물과 식물플랑크톤의 상호관계. I. 수영만의 해양세균과 식물플랑크톤 우점종간의 상호관계. 한수지. 26(5), 446-457
- 김진규. 1989. 마산만의 식물 플랑크톤 군집 동태에 관한 수치모델. 한양대학교대학원 박사학위논문
- 김학균. 1989. 마산만의 편모조적조의 발생과 환경특성. 수진연구보고 43 p. 1-40
- 마산시. 1994. 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링. p. 17-25, p. 95-121
- 박영철. 1995. 겨울철 부산항 주변해역의 이화학적 환경특성. 부산수산대학교 공학석사 학위논문. p.10-20., p.27
- 박주석. 1979. 마산만의 환경오염 평가를 위한 야의 생물 오염 시험 연구. 한해지 v.14(1), 15-25
- 부산시. 1990. 부산 신도시 건설사업 환경영향 평가서. p.143-145
- 심재형, 최중기. 1978. 한강하류에 있어서 부유성 규조군집의 구조 및 기능변화에 관한 연구. v.13(2),31-41
- 심재형, 신은영, 최중기. 1981. 여수근해의 쌍편모조류의 분류학적 연구. 한해지, 16 : 57-98
- 유광일. 1980. 오염해역에 있어서의 생물군집의 환경지표성에 관한 연구. 환경과학회지 v.1 10-14
- 이동수. 1993. 우리나라 주변해역의 오염현황과 오염원. 한해지 v.28(2),132-136
- 이은주, 권정로. 1995. 수영만 해역의 오염물질 거동에 대한 수치 평가 모델의 개발. J. of KSEE v.17(8) 723-733
- 이진환, 한명수, 허형택. 1981. 진해만의 적조원인 생물에 관한 연구. Bull. of KOR-DI 3:97-105
- 日本水産學會, 1982. 沿岸海域의 副營養化와 生物指標. p.27-40
- KORDI. 1980. A preliminary investigation system for the red tides in Jinhae Bay. Korea Ocean Res. & Dev. Inst. Report, BSPE 00022-43-7.
- KORDI. 1981. A study on the monitoring system for the red-tides in Jinhae Bay. Ocean Res. & Dev. Inst. Report, BSPE 00031-56-7.
- KORDI. 1982. Studies on the development of the red-tide and pollution monitoring system in Jinhae Bay. Ocean Res. & Dev. Inst. Report, BSPE 00044-66-7.
- Michael McCormick J., Patricia T. Quinn. 1975. Phytoplankton diversity and chlorophyll-A in a polluted estuary. Marine Pollution Bull. v.6, 105-106
- Riley, J. P. and R. Chester. 1971. Introduction to marine chemistry. Academic Press N. Y.