

Review

부유생물을 이용한 해양생태계 건강성 평가

김영옥^{1*} · 최현우² · 장민철¹ · 장풍국¹ · 이원제³ · 신경순¹ · 장 만¹

¹한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목리 391
²한국해양연구원 해양자료정보실
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호
³경남대학교 환경공학과
(631-701) 경상남도 마산시 월영동 449

A Brief Review of Approaches Using Planktonic Organisms to Assess Marine Ecosystem Health**Young-Ok Kim^{1*}, Hyun-Woo Choi², Min-Chul Jang¹, Pung-Kuk Jang¹, Won Je Lee³, Kyoungsoon Shin¹, and Man Jang¹**

¹*South Sea Research Institute, KORDI
Geoje 656-830, Korea*

²*Ocean Data and Information Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

³*Department of Environmental Engineering, Kyungnam University
Masan 631-701, Korea*

Abstract : Plankton communities have close relationships with environmental changes in water columns. Thus, the use of plankton as a biological tool for assessing the marine ecosystem health may be effective. Major issue regarding coastal pollution has been usually recognized as phytoplankton blooms or red tides caused by the eutrophication, an increase in concentration of inorganic nutrients such as nitrogen and phosphorus. However, in order to understand the effects of the overall pollution on marine ecosystem, the organic pollutants as well as the inorganic nutrients should be also considered. For understanding the effects of the organic pollution, among the planktonic organisms, heterotrophic bacteria, heterotrophic flagellates and ciliates should be investigated. Generally, there are three approaches for assessing the marine ecosystem health using the plankton taxa or plankton communities. The first one is a community-based approach such as diversity index and chlorophyll *a* concentration which are common in analysis of the plankton communities. The second is an individual-based approach which is to monitor the pollution indicative species. This approach needs one's ability to identify the plankton to species level. The last approach is a bioassay of toxicity, which can be applied to the plankton. A pilot study in Masan Bay was conducted to assess the effects of the inorganic and organic pollution. In this article, a new approach using plankton communities was tentatively presented as a biological tool for assessing the ecosystem health of Masan Bay.

Key words : plankton, environmental assessment, marine ecosystem health, microbial loop, Masan Bay

*Corresponding author. E-mail : yokim@kordi.re.kr

1. 서 론

국내에서 부유생물을 이용한 해양환경의 평가 시 흔히 조사하는 항목으로 종다양성지수를 들 수 있다. 일반적으로 다양성지수가 낮은 수역은 상대적 오염도가 높으며 반대로 높은 다양성지수 값은 다양한 생물서식에 적합한 건강 수역을 반영한다고 이해하고 있다. 수심이 낮고 수괴가 정체되어 있는 부영양수역은 유리한 경쟁자의 빠른 증식에 의한 단일종 우점에 유리한 환경이라 언급하고 있다 (Reynolds 1988; Smayda 2002). 국내 대표적 오염해역으로 알려진 마산만도 이 같은 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다. 오염정도가 가장 심한 만의 최 내측 수역은 동물플랑크톤 군집의 다양성 지수가 1.0 이하로 크게 감소하며 단일종 대발생이 빈번히 관찰되고 있다(Fig. 1).

부유생물은 크게 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 군집으로 나누어 연구되고 있다. 1980년대 이전까지는 광합성을 통해 식물플랑크톤이 생산한 에너지가 이들의 포식자인 동물플랑크톤에게 전달되고 다시 다음단계의 포식자인 치어와 상위 포식자인 성어로 연결되는 먹이사슬로 일명 “Grazing food chain”의 개념 속에서 부유생물의 중요성이 강조되어 왔다. 다양성지수도 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 두 분류군에 한하여 측정되어 해양환경평가 시 적

용하고 있다. 이 후, 현미경 기술과 세포 관찰법의 발전에 의해 연약하여 쉽게 소실되거나 크기가 작아 간과되는 부유생물의 존재와 이들의 높은 생물량이 확인되었으며 기존의 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤과 함께 이들 분류군의 연구도 강조하고 있다. 수중의 용존유기탄소(dissolved organic carbon: DOC)를 분해하는 중속영양 박테리아(heterotrophic bacteria: HB), 이들을 포식하는 중속영양

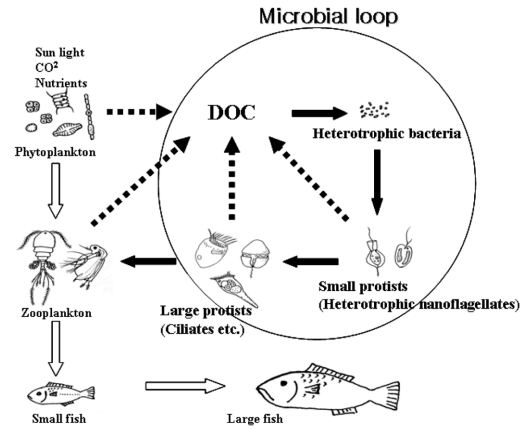


Fig. 2. Major planktonic components in grazing food chain and microbial loop.

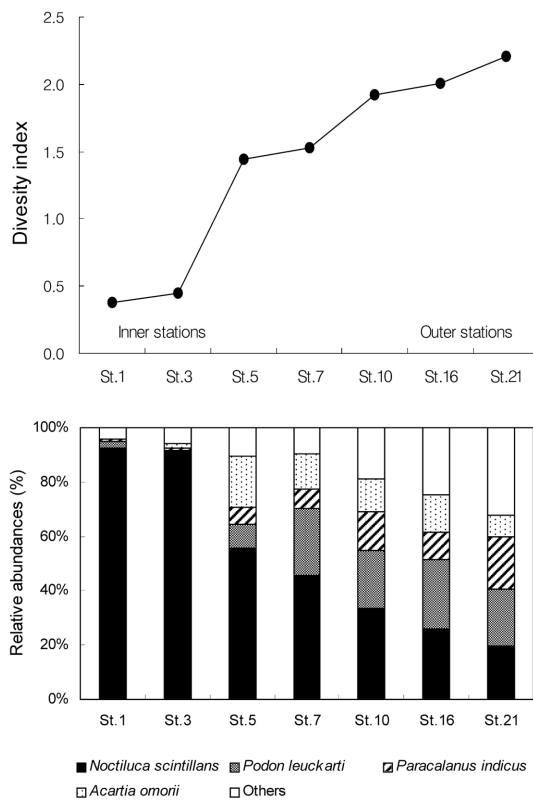
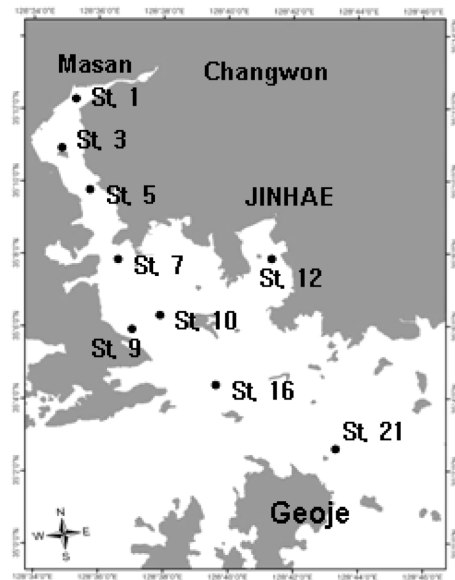


Fig. 1. Changes in diversity index of zooplankton community and relative abundances of dominant species in Masan Bay (data source from Jang, 2006; data collected in April 2004).



미세편모류(heterotrophic nanoflagellates: HNF), 이어 미소동물플랑크톤인 섬모류(ciliates)로 연결되는 미소생물환(microbial loop)은 부유생물을 통한 에너지 흐름의 해석을 새롭게 하고 있다(Fig. 2). 특히 미소생물환내 종속영양성 부유생물은 편모류와 섬모류에 속하는 원생생물로 이들 생물군은 무산소나 고농도 황화수소 환경 하에서도 생존할 수 있는 종류를 포함하고 있어 유럽에서는 150년 전부터 수질평가를 위해 이들 생물군의 사용이 제시되었으며 현재에도 담수권 중심으로 널리 활용되고 있다(Sládeček 1973; Shen *et al.* 1986; Foissner 1992). 반면 해양에서 원생생물을 이용한 수질평가는 극히 제한되어 있으며 이는 담수에 비해 해산 원생생물의 분류학적 기반이 취약하고 종 특이적 생태학적 관련 정보가 부족함에 그 원인이 있다.

국내에서는 오랫동안 부영양화 즉 무기영양염의 과잉 공급에 따른 식물플랑크톤 대발생 및 적조에 중점을 두어 부유생태계의 변화를 무기오염에 대한 반응으로 다루어 왔다. 따라서 유기오염에 의한 부유생태계의 변화는 간과되어 왔다. 차후 국내에서도 유기오염과 관련이 깊은 박테리아, 편모류, 섬모류와 같은 원생생물을 분석하고 이를 이용한 해양환경의 생물학적 평가를 시도하여야 한다. 본 연구를 통해 국외에서 보고된 부유생물을 이용한 해양환경의 평가 사례를 검토하고 마산만 조사자료 분석을 통한 국내 적용가능성 및 문제점을 파악하여 미래 관련 분야 연구의 기초를 다지고자 한다.

2. 재료 및 방법

분석자료는 2004년부터 2006년까지 3년간 마산만 내측에서 외측으로 4-12개 정점을 선정하여 총 20회 시기별 조사를 통해 얻은 자료(장 2006)와 2006년 4월, 8월, 11월과 2007년 2월에 마산일대 31개의 정점을 선정하여 계절별 조사를 통해 확보한 자료와 2007년 4월과 8월에 8개 정점에서 추가 분석한 결과를 사용하였다(미발표 보유자료). 아울러 1992년부터 2006년까지 국립수산과학원에서 측정된 마산만 주변해역의 chlorophyll *a*(chl. *a*)와 용존무기질소 농도 자료를 토대로 이들 간의 상관관계를 분석하였다. 부유생물은 식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 박테리아, 미세편모류, 섬모류의 분류군을 다루었으며 오염환경요인으로 유기오염원은 용존유기탄소, 무기오염원은 용존무기질소를 중심으로 자료를 정리하여 분석하였다.

2006년 8월의 무기오염원과 부유생물은 용존무기질소(DIN)와 chl. *a*를 유기오염원과 부유생물은 DOC와 HB를 각각의 지표로 사용하였고, 통합된 마산만의 해양환경을 파악하기 위해 4가지 지표를 표준점수(Z-score)로 계산하였고, 통합된 표준점수의 공간 분포도는 ArcGIS의 공간보

간법(IDW: Inverse Distance Weight)을 사용하여 작성하였다.

3. 결과 및 토의

부유생물 군집 특성에 따른 해역 건강도 평가
무기오염과 식물플랑크톤의 관계

연안해역에 유입되는 질소와 인과 같은 무기영양염과 가장 밀접한 관계를 맺고 있는 부유생물은 식물플랑크톤으로 무기영양염의 과도한 공급은 이들의 대발생을 야기하고 chl. *a* 농도를 증가시키는 결과로 표출된다. Chl. *a* 농도는 해수수질 평가의 한 지표로 사용되며 현재 미국 환경부에서는 Table 1과 같이 해역 따라 기준치를 차등 적용하고 있다(US EPA 2004). 2004년부터 2006년까지 3년간 마산만 표층수 측정치 분석결과 0.06-81.89 μgL^{-1} 의 범위의 농도가 측정되었으며 EPA의 연안해역의 기준치를 적용하여 마산만 내측 수역 즉, 오염심화 수역의 측정치를 평가하면 Table 2와 같다. 미국의 동서 연안역 기준치를 적용하면 마산만은 사계절 모두 양호(Fair)의 등급

Table 1. Criteria for assessing chlorophyll *a* in US EPA (2004).

Areas	Good	Fair	Poor
East/Gulf, West Coast sites	< 5 μgL^{-1}	5-20 μgL^{-1}	> 20 μgL^{-1}
Hawaii Puerto Rico	< 0.5 μgL^{-1}	0.5-1 μgL^{-1}	> 1 μgL^{-1}
Florida Bay sites	< 1 μgL^{-1}	1-5 μgL^{-1}	> 5 μgL^{-1}

Table 2. Seasonal averages of chlorophyll *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$) in Masan Bay from 2004 to 2006.

	Spring (Apr.-June)	Summer (Jul.-Sept.)	Fall (Oct.-Dec.)	Winter (Jan.-Mar)
Number of data	24	24	24	27
Mean	14.47	19.76	7.82	5.12
Range	0.20-70.84	1.30-63.34	0.94-36.94	1.03-18.94
S.D.	20.62	17.49	8.07	4.08

Table 3. Spatial averages of chlorophyll *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$) in Masan Bay from 2004 to 2006.

	St. 1	St. 9	St. 12	St. 21
Number of data	25	25	25	24
Mean	18.07	9.13	13.72	5.19
Range	1.17-3.34	0.48-37.42	0.52-70.84	0.20-21.44
S.D.	20.62	9.60	8.07	5.86

St. 1: Masan Harbor, St. 9: central area in Masan Bay, St. 12: Haengam Harbor, St. 21: outer area in Masan Bay.

에 해당된다. 또한 마산만 수역 중에 육상에 인접한 수역 (정점 1과 12)은 중앙수로나 외측수역에 비해 높은 농도를 보이고 있다(Table 3, Fig. 1: 지도). 이 같이 마산만의 시기별과 수역별 차이가 뚜렷함에도 불구하고 미국의 기준치는 양호의 범위(5-20 $\mu\text{g L}^{-1}$)가 광범위하여 마산만의 측정치를 적용하면 시기별, 수역별 차이가 나타나지 않는다. 국내의 경우 chl. *a*가 지표로 설정된 수질기준이 부재하므로 국내 측정치 특성을 고려한 기준 설정이 시급하다. 마산만에서 측정된 chl. *a* 농도와 용존무기질소(DIN) 농도 사이에는 유의성 있는 상관관계를 보이고 있다(Fig. 3). 현재 설정되어 있는 국내 해양환경기준(용존무기질소)에 근거하여 chl. *a* 농도를 구분하여 잠정적 기준을 정하면 Table 4와 같이 정리된다. Table 4의 기준치를 적용하면 2004년부터 2006년까지 마산만 chl. *a* 농도의 계절별

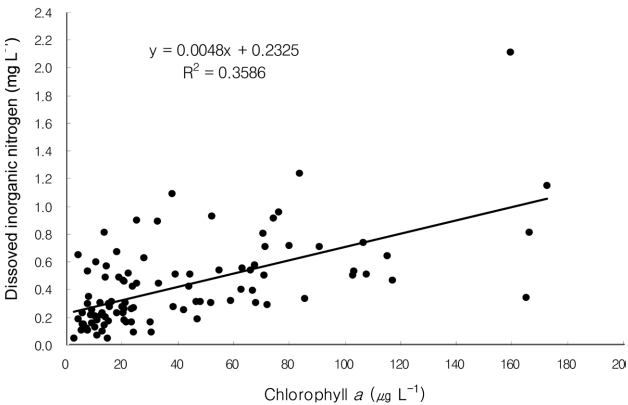


Fig. 3. Relationship between DIN and chlorophyll *a* concentrations in Masan Bay from 2004 to 2006 (data source from Jang et al. 2006).

Table 4. Criteria for assessing chlorophyll *a* in Masan Bay based on DIN criteria in sea water quality.

Water quality	DIN (mg L ⁻¹)	Chlorophyll <i>a</i> (µg L ⁻¹)
I	< 0.3	< 14
II	0.3-0.6	14-77
III	0.6-1.0	77-160

Table 5. Relationships between DIN and chlorophyll *a* concentrations in Masan Bay (n=451, data source from NFRDI).

Month	Pearson correlation coefficient
February	0.206 (S)
May/June	0.735 (S)
August	0.301 (S)
November	-0.013 (NS)
Average	0.469

S: Significant, NS: Not significant (p<0.05)

평균치를 보면 춘계와 하계는 II 등급, 추계와 동계는 I 등급으로 구분되며, 정점별 결과의 경우 오염환경에 인접되어 있는 정점 1과 12는 II 등급이며 나머지 정점은 I 등급으로 구분된다. 이 잠정적 chl. *a* 농도 등급의 기준치는 미국의 기준보다 높으며 이는 현재의 해양환경기준내 DIN 등급 농도를 근거로 산정하였기 때문으로 판단되며 차후 국내 DIN 농도 등급이 조정되면 chl. *a* 농도 기준도 재검토되어야 한다. 미국의 경우 해역에 따라 기준치를 차등 적용하므로 Table 4에 제시된 chl. *a* 농도 기준치는 마산만에 국한하여 적용 가능성이 있으며 타 해역에 적용 시에는 각 해역의 자료를 면밀히 검토한 후 수정 및 보완이 필요하다. 국립수산과학원 측정자료(총 451개)의 경우 chl. *a* 농도와 DIN 농도의 관계는 계절별로 큰 차이를 보였다(Table 5). 유의성 있는 상관관계가 11월을 제외한 각 계절을 대표하는 각 시기에 측정되었으며, 특히 춘계 5월 또는 6월의 경우 상관계수가 0.735로 매우 높은 값이 측정되어 chl. *a* 농도와 DIN 농도의 관계는 매우 밀접하였다. 반면 외양수와 태풍의 영향이 상대적으로 큰 11월 추계에는 유의수준 이하의 낮은 상관계수를 보였다. 동계 2월은 수괴의 수직혼합에 의해 DIN 농도는 높으나 낮은 수온으로 식물플랑크톤의 성장이 둔화되고, 하계 8월의 경우 강우에 의한 DIN 급증과 동시에 물리적 교란에 의한 식물플랑크톤의 급감소와 같은 영향으로 춘계에 비해 chl. *a* 농도와 DIN 농도간의 상관성이 낮게 나타났다고 판단된다. 따라서 각 해역의 특성 뿐 아니라 계절에 따른 특성도 함께 고려한다면 평가의 신뢰도를 더욱 높일 수 있다.

홍콩 Tolo 항에서 해역의 건강도 평가 예를 보면, 생물학적 지표로 chl *a* 농도에 의한 식물플랑크톤의 정량적 평가와 함께 적조발생 빈도와 식물플랑크톤 분류군 중 규조류와 와편모조류 개체수 비율과 식물플랑크톤 다양성지수를 지표로 선별하여 정성적 평가를 추가하였다(Xu et al.

Table 6. Relative evaluation of Masan Bay ecosystem health based on the phytoplankton community characteristics (data source from Jang, 2006; St. 1, August, 2004-2006 and from unpublished data in 2007).

Indicators	Aug. 2004	Aug. 2005	Aug. 2006	Aug. 2007
Red tide occurrence	+	-	-	-
HAB occurrence	-	-	-	+
Diatoms/Dinoflagellates	1646.0	21.8	9.6	7.1
Diversity	0.015	2.644	2.442	1.382
Chl. <i>a</i> (µg L ⁻¹)	83.56	25.00	14.60	5.70

Red tide: >10⁷ cells L⁻¹, HAB: Harmful Algal Bloom (>10⁵ cells L⁻¹).

Diatoms/Dinoflagellates: abundance ratio.

2004). 적조의 발생 여부는 무기영양염에 의한 오염환경 뿐 아니라 어장의 안정성과 밀접한 관계가 있으므로 국내 해역에서도 적조에 의한 피해 상승지의 경우 건강성 평가 시 지표항목으로 추가 적용함이 바람직하다. 유해성 플랑크톤에 의한 적조의 경우 더욱 심각한 피해가 야기되므로 이 부분도 평가 시에 가중치를 충분히 고려하여야 할 것이다. 마찬가지로 내측 수역에서 5가지 항목(적조발생 빈도, 유해성 조류 대발생, 구조류와 편모조류 개체수 비율, 다양성 지수)으로 식물플랑크톤 군집을 이용한 계절별 및 연도별 상대적 평가 결과는 Table 6과 같다. 2004년과 2005년의 하계는 2006년과 2007년에 비해 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 chl. *a* 농도를 보였으며 특히 2004년에는 1.0 이하의 낮은 군집다양성과 적조발생의 결과로 상대적 건강성이 다른 해역보다 약화되어 있다고 할 수 있다. Chl. *a* 농도가 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상이었던 2004년과 2005년 8월의 경우 구조류가 대발생하였으며 특히 2004년의 경우 단일 우점종으로 *Skeletonema costatum*에 의한 적조가 관찰되어 구조류와 외편모조류의 개체수 비율이 2004년에 월등히 높은 값을 보였다. 이 같은 결과는 *Skeletonema costatum*과 같은 군체를 이루는 소형종은 세포의 수적인 면에서 압도적으로 우세하기 때문이다. 구조류와 외편모조류의 비율을 생체탄소량으로 취하면 이 같은 격차를 완화시킬 수 있다. 따라서 구조류와 외편모조류의 비율을 지표로 사용할 경우 세포 개체수가 아닌 생체량을 고려하여 적용함이 더욱 바람직하리라 판단된다.

유기오염과 원생생물의 관계

연안해역의 수환경과 부유생물의 반응은 무기영양염과 부유생물의 관계에 치우쳐 이해되고 있다. 유기오염원에 따른 부유생물의 반응에 초점을 둔 해양환경의 평가 병행

되어야 오염원과 부유생물과의 관계를 정확히 파악할 수 있다. 부유생물이 용이하게 활용하는 유기오염원은 용존 유기탄소(DOC)이며 이 DOC를 중심으로 부유생물 구성원 간의 피포식에 의한 에너지 흐름을 미소생물환(Microbial loop)이라 일컫고 있다. 미소생물환의 부유생물 구성원인 종속영양 박테리아(HB), 종속영양 편모류(HNF), 섬모류(Cil)와 같은 분류군의 생물량을 측정하여 해역평가에 반영하면 유기오염에 의한 영향을 가늠할 수 있다. Sargasso와 Caribbean 해역에서 박테리아와 미세편모류는 내해에서 외해의 방향으로 밀도가 크게 감소하였으며 North Adriatic 해역의 경우 성층이 발달된 부영양화해역에서 섬모류의 개체수가 급증하였다(Sieburth and Davis 1982; Revelante *et al.* 1985). 즉 미소생물환의 부유생물 구성원은 수질과 밀접한 분포를 보이고 있다. 국내에서도 섬모류의 군집을 지표로 해수 수질의 평가에 적용한 사례가 있으며 용존산소농도에 근거한 화학적 평가 지수는 섬모류 군집의 종다양성 지수와 음의 상관관계를 보이며 반대로 섬모류 개체수와는 양의 상관관계를 보였다(Xu *et al.* 2000). 이 같이 섬모류의 생물량이 오염환경과 밀접한 관계를 보이므로 구조류와 섬모류 생물량의 비율을 유기오염의 지수로 사용한 경우도 있다(Tacchi and Montanari 1985). 섬모류의 개체수는 이들의 먹이생물에 영향을 크게 받고 있으므로 먹이생물인 박테리아와 미세편모류를 포함하는 미소생물환 구성요소의 생물량 및 생산력으로 미소생물력(measure of microbial strength: MOMS)을 가늠하여 유기오염원에 의한 영향을 호소에서 평가한 선례가 있으며 MOMS는 빈영양수역에서 높으며 부영양수역에서 감소하며 특히 고수온기 성층이 잘 발달된 수역에서 높은 값을 나타낸다고 언급하고 있다(Porter *et al.* 1988). 차후 연안해역에 MOMS를 측정하여 그 활용 타당성을 검토할 필

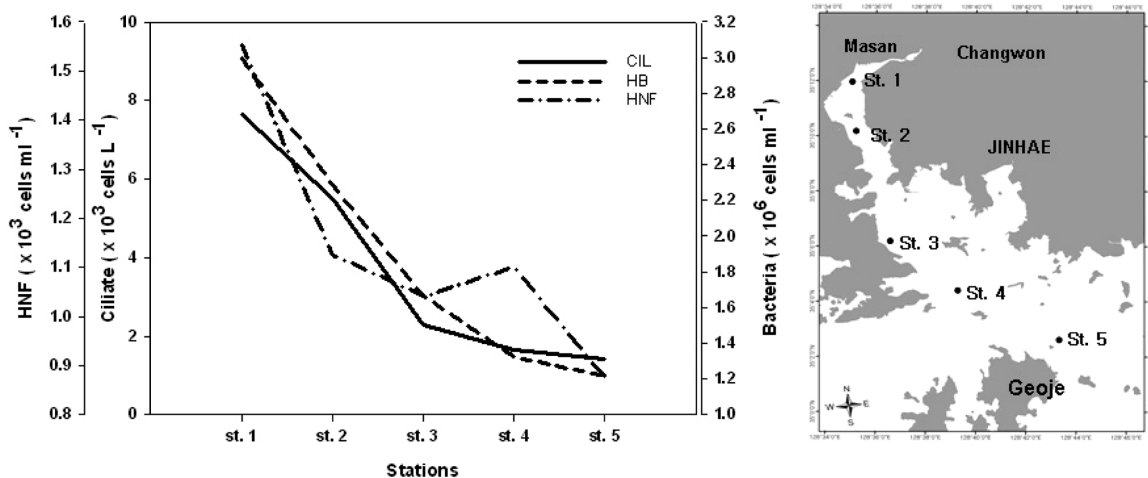


Fig. 4. Spatial changes in abundance averages of microbial component (ciliates:CIL, heterotrophic bacteria:HB, heterotrophic nanoflagellates:HNF) in Masan Bay from 2004 to 2006 (Jang 2006).

요가 있다. 한편 MOMS는 박테리아와 종속영양균의 생산성을 측정해야 하는 어려움이 있는 반면 미소소생물환 생물구성원(HB, HNF, CIL)의 개체수를 직접 적용하면 보다 용이한 평가가 가능하다. 마산만에서 이들 구성원의 개체수를 비교한 결과, 만의 외측에서 내측으로 갈수록 값이 증가하였으며 3가지 요소(HB, HNF, CIL)는 유기물 오염 환경을 반영하는 생물학적 지표세트로 그 활용 가능성이 높다고 판단된다(Fig. 4).

식물플랑크톤 분류군과 오염의 특성

일반적으로 부유생물의 분포는 영양염과 같은 화학적 환경요인뿐 아니라 해류와 같은 물리적 요인에 의해서도 큰 영향을 받는다. 해류의 이동이 제한적인 폐쇄형/반폐쇄형 수역인 경우 수괴의 수직구조는 성층형성에 유리하므로 규조류보다 편모조류의 분포가 유리하다고 보고되어 있다(Fogg and Thake 1987). 이 같은 수역의 경우 육상오염원의 지속적 축적이 야기된다. 무기영양염의 부영양화는 독립영양성 식물플랑크톤인 규조류의 우점을 유도하는 반면 유기오염원의 축적은 종속영양성 식물플랑크톤인 편모류의 우세한 분포로 그 차이를 보인다(Laybourn-Parry 1992). 대부분 육상으로부터 오염원 유입은 무기오염원과 유기오염원이 동시에 유입되므로 오염원의 형태만으로 식물플랑크톤 분류군의 차이가 실제 해역에서 발생되기는 어렵다. 그러나 지형적 차이 즉 반폐쇄형 또는 개방형의 지리적 차별이 가해지면 분류군의 변화를 유도할 수 있다. 반폐쇄형 수역은 해류의 이동이 제한되고 수괴의 성층화로 외편모조류의 증식에 아주 유리한 배경이 된다. 외편모조류는 무기영양염을 이용하는 독립영양 동시에 용존유기물 환경에서도 증식하는 소형 원생생물을 포식하는 종속영양을 겸비하는 혼합영양성으로 더욱 성공적 생존이 가능한 분류군이다. 오염해역에서는 외편모조류가 우점한 반면, 상대적 청정해역에서는 규조류가 우점하는 동일한 결과가 그리스 해안에서 보고되어 있다(Friligos and Koussouris 1984). 이 같은 배경으로 홍콩의 Tolo 항에서 해역의 건강성 평가를 위한 지표로 규조류와 외편모조류 비율이 적용되었고 수질이 악화된 1980년대 상대적 규조류의 분포가 약화된 반면 외편모조류의 분포가 상승한 결과를 보였다(Xu et al. 2004). 마산만의 경우도 해류의 이동이 제한된 만 내측에서는 소형 외편모조류(*Heterocapsa triquetra*, *Prorocentrum minimum*, *P. triestinum*, *P. dentatum*)의 우점적 출현이 외측의 해류의 이동이 양호한 수역보다 빈번히 관찰되었다(장 2006). 규조류와 외편모조류는 이와 같은 생태학적 차이 뿐 아니라 두 분류군은 소유하는 색소의 구성도 차이를 갖고 있다. 외편모조류는 chl. *a* 뿐 아니라 carotenoid 계열 색소를 보유하고 있어 chl. *a*와 carotenoid 색소의 비율을 측

정하면 외편모조류의 상대적 증감이 파악되므로 생태계 건강성 평가에 활용할 수 있는 지표로 제시하고 있다(Paerl et al. 2005).

부유생물 중 특성에 따른 해역 건강도 평가 지표종에 의한 평가

미국의 The Bay Institute San Francisco는 1970년대부터 샌프란시스코만에서 8개의 지수를 선별 및 측정하여 생태학적 건강성을 평가하고 있다. 부유생물과 관련된 지수는 Food Web Index(FWI)가 있으며 FWI는 5가지 지표로 식물플랑크톤 생물량(Chl. *a*), 윤충류 개체수, 토착종 요각류 개체수 비율, 토착종 *Mysid mercedis* 개체수, 요각류와 지각류의 개체크기(개체당 습중량)를 각각 측정하여 지수화 하였고 연도별 지수의 변화로 건강성을 평가하였다. 외래종 유입에 의해 토종 부유생물의 약화가 생태계교란을 유발하며 이를 주제로 해역 건강성을 평가한 사례로 참고할 수 있는 방법이다(The Bay Institute Ecological Scorecard 2004).

수질평가를 위한 생물모니터링은 주로 어류와 저서생물 군집을 기반으로 행하였다. 어류의 경우 담수에서 다변수 모델기법을 적용하고 있다. 생물학적 건강도 지수(Index of Biological Integrity: IBI)와 물리적 서식지 평가지수(Quantitative Habitat Evaluation Index: QHEI) 그리고 화학적 수질특성을 조사하여 수계를 총체적으로 평가하는 방법의 좋은 예라 할 수 있다. 국내에서도 하천과 호소에서 유사한 방법으로 평가결과가 보고되고 있다(안과 김 2005; 권과 안 2006; 배와 안 2006; 최 등 2007; 이 등 2007). 해역에서는 저서생물을 이용하여 건강도 평가를 실시하고 있으며 미국에서는 중부 대서양 기수역에서 Mid-Atlantic Integrated Assessment(MAIA-Estuarines)가 대표적인 결과로 꼽을 수 있으며 영국 등 기타 국에서도 유사한 방법으로 평가하고 있다(Kiddon et al. 2003; Caeiro et al. 2005; Aubry and Elliott 2006).

식물플랑크톤에도 이 방법이 유사하게 적용되어 즉 다변수 매트릭을 세워 해역의 건강성 평가 시 활용한 사례가 있다(Lacouture et al. 2006; Williams et al. 2007). 미국의 Chesapeake Bay Program의 경우 생태계 건강성 평가 시에 사용하는 Biotic Index 중에 Phytoplankton Index가 세부지수로 측정되었다. 측정법은 18년 동안 조사된 자료를 활용하여 수역의 구분을 염분에 따라 일차적으로 나누고 다시 질산염, 인산염, 투명도를 근거로 식물플랑크톤 서식지 상태를 구분하였다. 각 구분된 수역에서 식물플랑크톤의 지표 항목 12개를 선별하여 매트릭을 만들고 지수화하여 평가하였다. 미국의 중부 대서양 지역의 담수권에서 측정한 또 다른 선례로 Diatom Index를 들 수 있다. Tolerance/intolerance 여부, autecological guilds, community

structure, morphological structure guilds로 부착성 규조류의 분류군을 생태학적 특성별로 나누어 메트릭을 만들고 각 메트릭에 대한 평점을 산정하고 전체 메트릭을 종합하여 Diatom Index를 구하는 방법이다(Fore 2003). 그러나 이 경우 문제점으로 식물플랑크톤 중 부착성 종류인 일명 periphyton 만을 분석하므로 실제 수중에 부유생활을 하는 진정한 의미의 부유생물을 대변하기에는 무리가 있다. 부유성 종류보다 중동정이 상대적으로 어려운 부착성 규조류에 관한 분류학적 기반이 약한 국내에서 효과적 적용을 위해서 기반 연구가 우선되어야 한다.

담수의 경우 오수생물 체계(saprobic system)에 의해 수질을 생물학적으로 평가하였다. 오수생물 체계는 생물학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand: BOD) 값에 근거한 수질오염정도에 따라 목록화된 원생생물의 지표종에 근거하여 수질을 평가하는 방법이다. 이 방법은 원생생물의 분류학 역사가 길어 기반이 다져진 유럽에서 시작되었으며 지표종 목록을 보완하면서 현재까지 지속적으로 활용되고 있다(Bick 1968; Sládeček 1973; Foissner 1988, 1992). BOD 농도에 따라 구분된 수질에 지표종의 출현 결과를 토대로 극부수성(polysaprobity), 중부수성(mesosaprobity), 빈부수성(oligosaprobity), kathrobity(청수성)으로 수환경을 단계별로 평가하고 있다. 시간적 진행에 따른 지표종 생물상의 변화를 파악하기 위해 인공부착기질(Polyurethane Foam Unit: PFU)을 이용한 원생생물의 biomonitoring 방법이 제시되기도 하였다(Buikema *et al.* 1983; Shen *et al.* 1986). 국내에서도 이와 유사한 방법을 적용하여 수질을 평가한 선례가 있다(Chung *et al.* 1999; Xu *et al.* 2002). 그러나 국내에서 이 방법의 적용이 크게 확산되지 못하고 있으며 이유는 원생생물의 분류 전문가가 극소수이고, 특히 해양의 경우 원생생물의 분류, 생태 연구는 기반이 더욱 취약하므로 전문가 확충이 선행되어야 한다.

부유생물을 이용한 bioassay

오염환경을 관측하고 독성물질의 효과를 기증하기 위해 주로 어류를 표준생물로 사용하고 있다(Sprague 1973). 그러나 어류를 이용할 경우 시간적 경제적 소모가 큰 단점을 지니고 있어 보다 간편하고 경제적인 생물재료로 단세포생물인 섬모류가 제시되었다(Cairns 1979; Parker 1983; Lynn and Gilron 1992). 담수의 경우 지표성 섬모류 *Tetrahymena pyriformis*가 대표적인 독성평가 생물로 활용하고 있으며 다양한 오염원에 대한 생물반응의 결과가 보고되어 왔다(Lynn and Gilron 1992). 이에 비해 해산의 경우 섬모류를 이용한 독성검사는 극히 제한되어 있으며 비교적 실내 배양이 용이한 *Uronema*나 *Euplotes* 속의 몇몇 종류를 적용하여 독성 실험 결과가 보고되어

있다(Personne and Uyttersfrot 1975; Parker 1983; Dini 1981). 한편 동물플랑크톤의 경우 미국 EPA에서 Sediment Quality Index 측정을 위해 단각류 *Ampelisca abdita*을 표준생물로 퇴적물 독성을 평가하고 있다(US EPA 2004). 단각류는 엄밀한 의미로 저서생물로 다루어져야 하므로 수중의 환경을 반영하는 부유생물을 활용한 평가로 보기에는 다소 무리가 있다. 식물플랑크톤의 경우도 실내 배양실험을 통해 다양한 오염물질에 관한 결과를 제시하는 수준에 머물고 있으며 규조류 *Phaeodactylum tricorutum*, *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira pseudonana*는 중금속에 의한 영향을 평가 시 사용하는 종류로 보고되어 있다(Maestrini 1984). 따라서 해양의 경우 오염을 평가하기 위한 생물학적 도구로 부유생물에 속하는 표준생물은 아직 보고되어 있지 않다. 따라서 해양의 수중환경과 가장 밀접한 관계를 보이는 부유생물로부터 수환경의 변화를 가늠할 수 있는 표준생물이 개발되어야 한다. 특히 섬모류를 포함하는 원생생물의 경우 다양한 수환경하에서 다양한 종류가 종 특이적 서식환경을 영유하므로 타 분류군보다 표준생물로의 개발 가능성이 높은 생물군이라 할 수 있다.

부유생물에 의한 해역 건강성 평가 사례

마산만의 부유생물 지표와 지수

마산만은 남북으로 좁은 수로가 길게 연결되어 있으며 내측 수역은 육상배출수의 영향을 크게 받아 오염이 심화되어 있으며 외측으로 갈수록 오염의 영향이 약화되는 오염구배가 매우 뚜렷한 지리적 특성을 지니고 있다. 따라서 마산만 해역은 연안생태계에서 오염 정도에 따른 부유생물의 변화를 감지할 수 있는 최적의 연구 장소라 할 수 있다. 마산만의 수평적 오염구배에 따른 부유생물군집의 변화를 파악하기 위해 2006년 8월 마산만 일대 31개 정점에서 부유생물 군집과 관련 환경요인을 분석하여 마산만 부유생물지수의 산출을 시도하였다.

부유생물은 무기오염원과 유기오염원에 따라 그 반응이 차이를 보이므로 두 그룹을 나누어 일차적인 평가를 거친 후 다시 최종적으로 종합하는 방법으로 접근하였다. 무기오염원의 기본 지표로 용존무기질소(DIN)를 선별하였고 이에 반응하는 부유생물은 광합성을 하는 독립영양성 식물플랑크톤으로 이들의 생물량을 대변하는 chl. *a*의 농도를 부유생물의 기본 지표로 선별하였다. 유기오염원의 기본 지표는 미소생물환경의 주요 요소인 용존유기탄소(DOC)와 이것을 분해하여 에너지를 얻는 중속영양성 박테리아(HB)를 부유생물 지표로 선별하여 유기오염에 대한 생물학적 평가를 하였다. DIN과 chl. *a*의 농도는 내측의 고농도와 외측의 저농도 경계가 마산만 수로가 넓어지는 수역에서 뚜렷이 나타났다. 박테리아도 이와 상응하

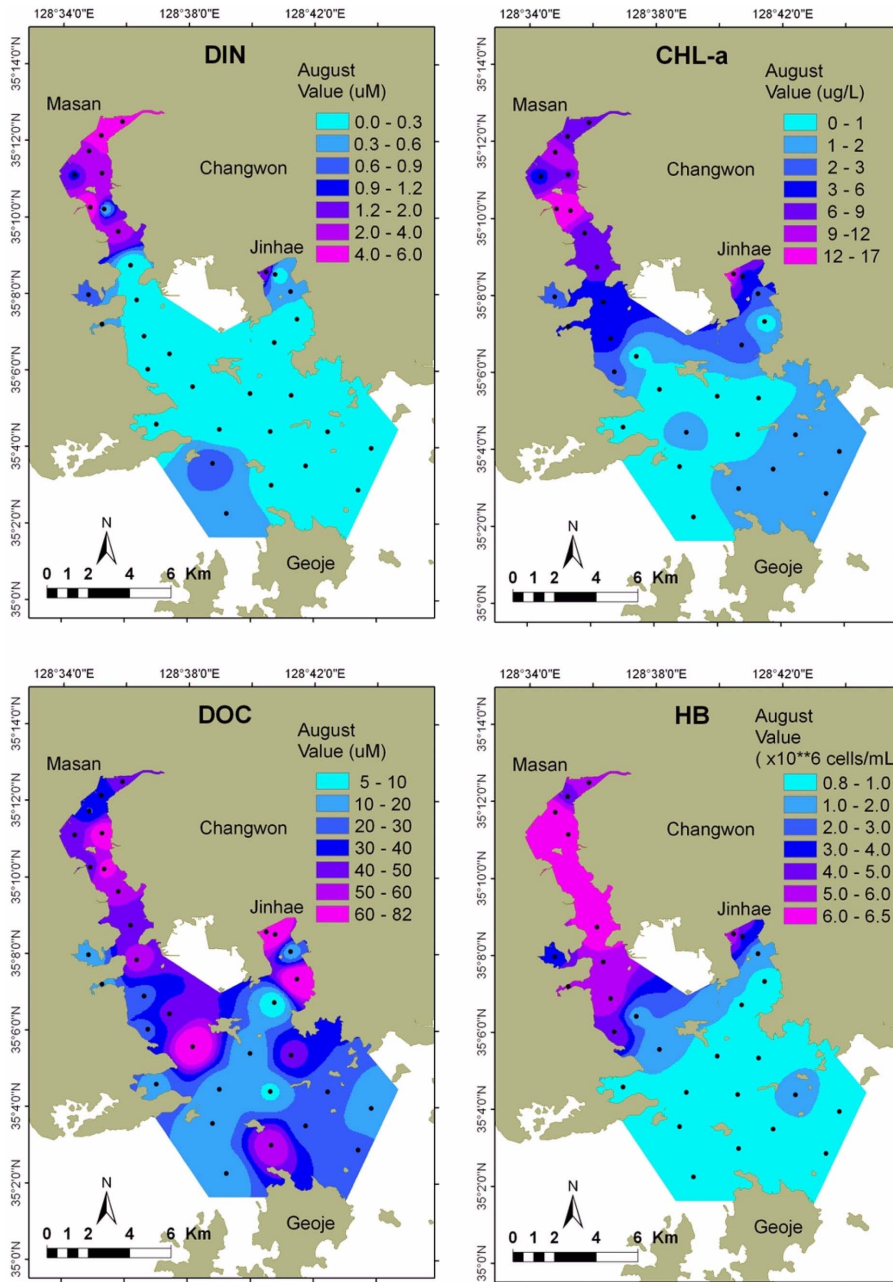


Fig. 5. Spatial distribution of dissolved inorganic nitrogen (DIN), chlorophyll *a* (chl. *a*), dissolved organic carbon (DOC), and heterotrophic bacteria (HB) in Masan Bay in August 2006.

는 밀도 구배를 보였으며 DOC는 내측뿐 아니라 일부 중앙과 외측수역에서도 고농도의 분포를 보여 앞의 세 지표와 다소 차이를 보였다(Fig. 5).

무기오염환경을 반영하는 지표인 DIN과 chl. *a*, 유기오염환경을 반영하는 지표인 DOC와 HB에 대해 원 점수 (raw score)의 상대적 위치를 나타내는 표준점수(Z-score)로 계산하여 무기오염환경과 유기오염환경의 표준점수에 의한 공간분포를 각각 산출하였다(Figs. 6a, b). Z-score는 정규분포 가정 하에 원 점수의 평균을 “0”으로 하고 표준

편차를 ± 1 로 하는 변환 점수이므로 0.6~1.0 사이의 수역은 DIN과 chl. *a*의 농도가 높은 상대적으로 무기오염에 의한 영향이 큰 수역이며, 반대로 -0.6 이하의 수역은 농도가 낮은 상대적 청정 수역으로 대별할 수 있다. DOC와 HB의 경우도 무기오염의 영향보다 유기오염의 영향이 마산만 중앙수역까지 확대되어 있다고 할 수 있다. 또한 네 가지 지표에 대하여 통합된 Z-score의 공간분포도(Fig. 6c)에 의하면 마산만의 유·무기오염환경을 종합적으로 파악할 수 있어 Z-score 값에 의한 통합 결과를 부유생물

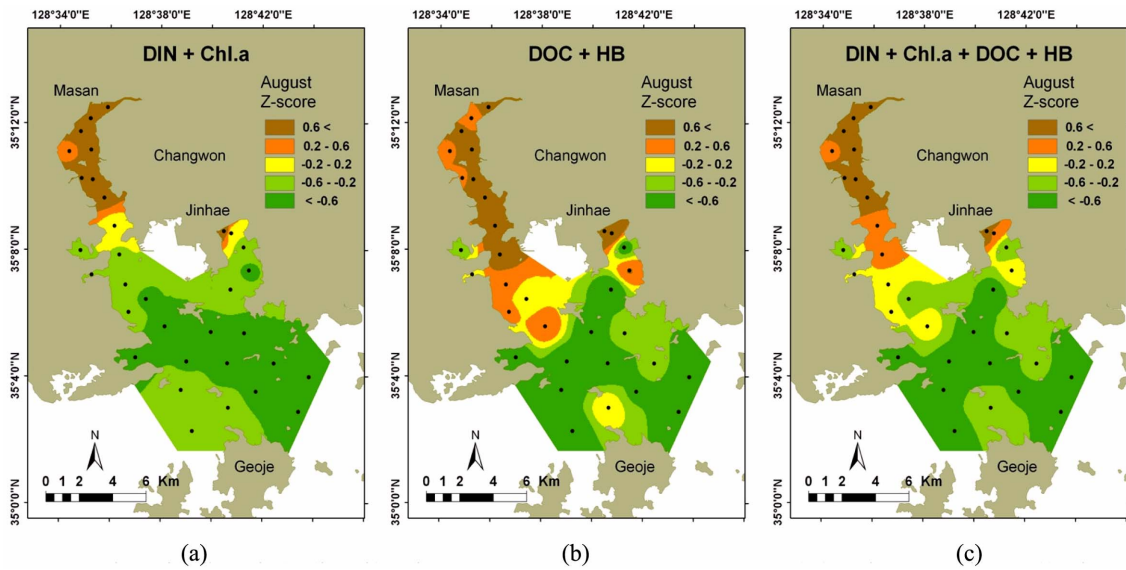


Fig. 6. Spatial distributions of Z-score transformed by inorganic pollution indicators (DIN, chl. *a*), organic pollution indicators (DOC, HB), and integrated four indicators (DIN, chl. *a*, DOC, HB) in Masan Bay, August 2006.

지수로 활용할 수 있다.

마산만 부유생물을 이용한 해양 건강성 평가의 문제점 및 개선안

마산만의 경우 앞서 언급했듯이 DIN과 chl. *a*의 관계는 시기별로 차이를 보이고 있다. 특히 추계의 경우 외양수 영향으로 chl. *a*의 값은 높으나 DIN 농도는 낮은 경우가 빈번하여 두 요인의 사이에 상관성이 나타나지 않는다. 따라서 계절의 특성을 충분히 고려한 지표의 설정이 바람직하다. 유기오염의 영향 평가를 위한 DOC와 HB의 두 지표와 연계하여 HB를 포식하는 종속영양 편모류와 섬모류를 추가항목으로 평가하여 미세먹이환의 생물구성원 전체를 다루어 DOC로부터 최종소비자인 섬모류까지 포함하는 저차생산단계의 부유생물 군집 수준에서 해양 건강성 평가가 되어야 한다. 본 사례연구는 식물플랑크톤과 박테리아에 초점을 두었으며 중형 동물플랑크톤을 이용한 평가는 결여되어 있다. 마산, 진해만에서 동물플랑크톤 중요각류 *Acartia omorii*는 COD와 DIN과 높은 양의 상관관계가 있음이 이미 보고되어 있으며 이 밖에 동물플랑크톤의 오염지표성에 관한 선행연구를 참고하여 그 활용 가능성이 검토되어야 한다(박과 이 1982; 장 1996).

마산만은 상승적 적조발생 해역으로 최근 몇 년 동안 수온이 낮은 동계에도 적조가 관찰되고 있다(장 2006). 적조원인 생물도 다양해지고 있으며 식물플랑크톤 뿐 아니라 부유성 섬모충인 *Mesodinium rubrum*에 의한 적조(미 발표 자료)도 관찰되고 있다. 따라서 마산만의 경우 적조의 발생과 규모 및 유해성 여부에 따른 건강성 평가도 반드시 차후 고려할 사항으로 제안하는 바이다.

4. 결 론

부유생물은 수중의 환경과 가장 밀접한 관계를 맺고 있는 생물군이다. 따라서 해양의 수중 환경을 평가하기 위한 생물학적 방법은 부유생물의 활용을 통해 해양 건강성 평가방법을 모색하고자 한다. 수질오염과 부유생물과의 관계는 주로 무기영양염의 부영양화에 의한 적조 즉 식물플랑크톤의 대발생 현상으로 편중되어 이해되고 있다. 그러나 유기오염원에 의한 부유생물의 영향도 병행하여야 오염 전반에 의한 영향을 정확히 평가할 수 있다. 따라서 유기오염과 밀접한 부유생물군으로 종속영양박테리아, 종속영양 편모류, 섬모류의 분석이 강화되어야 한다. 부유생물을 이용한 해양 환경평가는 크게 세 가지 방법으로 적용할 수 있다. 첫째로 부유생물을 군집 수준에서 평가하는 경우로 국내에서도 다양성지수와 클로로필 농도와 같은 항목이 여기에 포함된다. 클로로필 농도는 가장 보편적으로 쓰이는 평가 항목이나 국내에는 평가 기준치가 부재하여 상대적 비교만 가능한 실정이다. 두 번째 부유생물의 종의 특성을 고려한 방법을 들 수 있다. 환경의 변화에 민감한 지표종을 근거로 오염정도를 평가하는 방법으로 지표종의 선별을 위한 분류학적 전문성이 뒷받침되어야 한다. 세 번째는 표준생물을 이용한 독성실험에 의한 평가법을 들 수 있다. 이 방법은 다양한 부유생물로부터 표준생물을 개발하고 독성실험의 표준화가 우선적으로 마련되어야 한다. 부유생물을 이용한 해양 건강성 평가의 연구사례로 마산만의 무기오염과 유기오염 관련 지표를 각각 선별하여 마산만 일대에서 조사한 부유생물에 의한 생태계 건강성 평가 결과를 공간분포도로 표현하였으며 차후 부유

생물지수로의 활용을 모색하고자 한다.

사 사

본 연구는 2007년도 한국해양연구원 정책사업 “연안해양 건강도 평가를 위한 기반구축연구(PE97904)” 사업과 2006년도 과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10466-0). 본 연구를 위해 자료수집에 도움을 주신 한국해양연구원 남해연구소 부유생물연구팀 연구원 그리고 본 논문을 검토해 주신 심사위원님께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- 권영수, 안광국. 2006. 금호강 수계에서 생물학적 하천 건강도 및 이화학적 특성. *한국유수학회지*, 39, 145-156.
- 박주석, 이삼석. 1982. 남해안의 환경오염 진행과 모악류 및 요각류의 생물학적 오염지표성 연구. *수산진흥원연구보고*, 28, 89-127.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 갑천생태계 평가. *한국유수학회지*, 39, 198-208.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. *한국유수학회지*, 38, 361-371.
- 이의행, 최지웅, 이재훈, 안광국. 2007. 어류모델 베타릭, 물리적 서식지 변수 및 수질특성 분석에 의한 섬진강의 생태 건강성 진단. *한국유수학회지*, 40, 184-192.
- 장만. 2006. 남해 특별관리해역의 환경위해성평가 연구(I) 마산연안 중심연구. 한국해양연구원. BSPE97104-1863-3. 592 p.
- 장민철. 1996. 부산 및 진해 연근해에 출현하는 동물플랑크톤 오염지표종 개발에 대한 연구. 이학석사 학위논문, 한국해양대학교, 112 p.
- 최지웅, 이의행, 이재훈, 안광국. 2007. 어류를 이용한 낙동강 수계의 생물학적 수질 평가. *한국유수학회지*, 40, 254-263.
- Aubry, A. and M. Elliott. 2006. The use of environmental integrative indicators to assess seabed disturbance in estuaries and coasts: Application to the Humber Estuary, UK. *Mar. Pollut. Bull.*, 53, 175-185.
- Bick, H. 1968. Autökologische und saprobiologische Untersuchungen an Süßwasserciliaten. *Hydrobiologie*, 31, 17-36.
- Buikema, A.L., J. Cairns, and W.H. Youngue. 1983. Correlation between the autotrophic index and protozoan colonization rates as indicators of pollution stress. p.204-219. In: *Aquatic Toxicology and Hazard Assessment: Sixth Symposium. American Society for Testing and Materials*. Philadelphia, Pennsylvania.
- Cairo, S., M.H. Costa, P. Goovaerts, and F. Martins. 2005. Benthic biotope index for classifying habitats in the sado estuary: Portugal. *Mar. Environ. Res.*, 60, 570-593.
- Cairns, J. 1979. A strategy for use of protozoans in the evaluation of hazardous substances, p.1-17. In: *Biological Indicators of Water Quality*. Academic Press, New York.
- Chung, P.R., K.S. Cho, Y. Jung, Y. Shen, and M. Gu. 1999. Biological evaluation of running waters in Korea, with special reference to bioassessment using the PFU system. *Hydrobiologia*, 390, 107-115.
- Dini, F. 1981. Relationship between breeding systems and resistance to mercury in *Euplotes crassus* (Ciliophora; Hypotrichida). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 4, 195-202.
- Fogg, G.E. and B. Thake. 1987. Algal cultures and phytoplankton ecology. The University of Wisconsin Press, Wisconsin. 269 p.
- Foissner, W. 1988. Taxonomic and nomenclatural revision of Sládeček's list of ciliates (Protozoa: Ciliophora) as indicators of water quality. *Hydrobiologia*, 166, 1-64.
- Foissner, W. 1992. Evaluating water quality using protozoa and saprobity indexes. p. B11.1-B11.20. In: *Protocols in protozoology*. Society of protozoologists, Kansas.
- Fore, L.S. 2003. Response of diatom assemblages to human disturbance: Development and testing of a multimetric index for the Mid-Atlantic Region (USA). p. 445-471. In: *Biological response signatures*. CRC Press, New York.
- Friligos, N. and T. Koussouris. 1984. Preliminary observations on sewage nutrient enrichment and phytoplankton ecology in the Thermaikos Gulf, Thessaloniki, Greece. *Vie et Milieu*, 34, 35-39.
- Kiddon, J.A., J.F. Paul, H.W. Buffum, C.S. Strobel, S.S. Hale, D. Cobb, and B.S. Brown. 2003. Ecological condition of US Mid-Atlantic estuaries, 1997-1998. *Mar. Pollut. Bull.*, 46, 1224-1244.
- Lacouture, R.V., J.M. Johnson, C. Buchanan, and H.G. Marshall. 2006. Phytoplankton Index of biotic integrity for Chesapeake Bay and its tidal tributaries. *Estuar. Coast.*, 29, 598-616.
- Laybourn-Parry, J. 1992. Protozoan plankton ecology. Chapman & Hall, London. 231 p.
- Lynn, D.H. and G.L. Gilron. 1992. A brief review of approaches using ciliated protists to assess aquatic ecosystem health. *J. Aquat. Ecosyst. Health.*, 1, 263-270.
- Maestrini, S.Y., M.R. Droop, and D.J. Bonin. 1984. Test algae as indicators of sea water quality: Prospects.

- p. 133-188. In: *Algae as ecological indicators*. Academic Press, London.
- Paerl, H.W., J. Dyble, J.L. Pinckney, L.M. Valdes, D.F. Millie, P.H. Moisaner, J.T. Morris, B. Bendis, and M.F. Piehler. 2005. Using microalgal indicators to assess human- and climate-induced ecological change in estuaries. p. 145-174. In: *Estuarine indicators*. CRC Press, New York.
- Parker, J.G. 1983. Ciliated protozoa in marine pollution studies. *Ecotoxicol. Environ. Safety*, 7, 172-178.
- Personne, G. and G. Uyttersfrot. 1975. The influence of inorganic and organic pollutants on the rate of reproduction of a marine hypotrichous ciliate: *Euplotes vannus* Muller. *Rev. Int. Oceanogr. Med.*, 37, 125-151.
- Porter, K.G., C.H. Paerl, R. Hodson, M. Pace, J. Priscu, B. Riemann, D. Scavia, and J. Stockner. 1988. Microbial interactions in lake food webs. p. 209-227. In: *Complex interaction in lake communities*. Springer-Verlag, New York.
- Revelante, N., M. Gilmartin, and N. Smolaka. 1985. The effects of Po River induced eutrophication on the distribution and community structure of ciliated protozoan and micrometazoan populations in the northern Adriatic Sea. *J. Plank. Res.*, 7, 461-471.
- Reynolds, C.S. 1988. Functional morphology and the adaptive strategies of freshwater phytoplankton. p. 388-433. In: *Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Shen, Y.F., A.L. Buikema, W.H. Yongue, J.R. Pratt, and J. Cairns. 1986. Use of protozoa communities to predict environmental effects of pollutants. *J. Protozool.*, 33, 146-151.
- Sieburth, J. McN. and P.G. Davis. 1982. The role of heterotrophic nanoplankton in the grazing and nurturing of planktonic bacteria in the Sargasso and Caribbean Seas. *Ann. Inst. Oceanogr., Paris*, 58, 285-296.
- Sládeček, V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 7, 1-218.
- Smayda, T.J. 2002. Adaptive ecology, growth strategies and the global bloom expansion of dinoflagellates. *J. Oceanogr.*, 58, 281-294.
- Sprague, J.B. 1973. The ABC's of pollutant bioassay using fish. Biological methods for the assessment of water quality. *Amer. Soc. Test. Materials, ASTM STP*, 528, 6-30.
- Tacchi, B. and M. Montanari. 1985. Research to determine the extent of organic pollution of the Genoese coastal waters diatom/ciliated protozoa ratios. *Oealia*, 11, 875-878.
- The Bay Institute Ecological Scorecard. 2004. San Francisco Bay (Suisun Bay) Food Web Index. San Francisco Bay Food Web Index Technical Report, April 6, 2004. 31 p.
- US EPA. 2004. National coastal condition report II. EPA, Washington DC. 286 p.
- William, M., B. Longstaff, C. Buchanan, R. Llansó, and P. Bergstrom. 2007. Development of an integrated and spatially explicit index of Chesapeake Bay Health (Bay Habitat Health index-BHHI). A Joint Initiative of the Chesapeake Bay Program's Tidal Monitoring and Analysis Workgroup (TMAW) & Living Resources and Analysis Group (LivRAW), Technical Documentation (v. 1.5), April 16th, 2007. 36 p.
- Xu, F.L., K.C. Lam, Z.Y. Zhao, W. Zhan, Y.D. Chen, and S. Tao. 2004. Marine coastal ecosystem health assessment: A case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecol. Model.*, 173, 355-370.
- Xu, K., J.K. Choi, E.J. Yang, K.C. Lee, and Y. Lei. 2002. Biomonitoring of coastal pollution status using protozoan communities with a modified PFU method. *Mar. Pollut. Bull.*, 44, 877-886.
- Xu, K., J.K. Choi, E.J. Yang, Y. Lei, and K.C. Lee. 2000. Assessment of planktonic ciliate communities as indicators of water quality in Incheon coastal waters. *The Yellow Sea*, 6, 50-58.

Received Nov. 1, 2007

Accepted Dec. 17, 2007