

<Note>

진해만에서 부유생물을 이용한 해양생태계 건강성평가 예비조사

백 승 호 · 최 현 우¹ · 김 영 옥*

한국해양연구원 남해연구소, ¹한국해양연구원 본원

A Preliminary Study for Marine Ecosystem Health Assessment Using the Planktonic Organism in Jinhae Bay

Seung Ho Baek, Hyun-Woo Choi¹ and Young Ok Kim*

Korea Ocean Research and Development Institute/South Sea Institute, Geoje 656-830, Korea

¹Korea Ocean Research and Development Institute/Ocean Data Management Team, 1270 Sadong, Ansan 426-744, Korea

Abstract – In order to assess the effect of pollution on marine ecosystem, we examined the plankton health assessment at 16 stations during summer season in Jinhae Bay. The organic and inorganic pollutant sources (dissolved organic carbon; DOC, chemical oxygen demand; COD and Chlorophyll *a*; Chl.*a*), including planktonic organism such as enterobacteria *Escherichia coli*, heterotrophic bacteria (HB), autotrophic nano-flagellates (ANF), heterotrophic nano flagellates (HNF), ciliate and harmful algal bloom species (HABs) were used to characterize marine ecosystem health assessment. Of these, we tentatively selected those items Chl.*a*, HABs, HB and *E. coli* for plankton health index (PHI). Also, the scoring criteria for each metric were based on a statistical analysis and then, the grades are rated on four levels. As a result, the ecological assessment of these data reveals that PHI in Jinhae Bay is rated as “Good or fair” for overall conditions. The present study suggests that the PHI might be considered as one of important management tool to assess marine ecosystem health of Jinhae Bay.

Key words : marine ecosystem health index (MEHI), microbial loop, plankton health index (PHI), Jinhae Bay

서 론

해양 생태계 건강성 (Marine ecosystem health: MEH) 이라는 용어는, 건강한 바다는 자연의 모습을 그대로 간직하며 바다 생물이 서로 어우러져 살며 각종 수산물이 풍성하게 수확되고 쾌적한 레저활동이 가능한 피상적인

이미지로 설명되었으나, 1990년 이후 과학적인 근거를 바탕으로 체계적으로 “바다의 생물이 활성이 있고, 생태계 구조와 유기적 관계를 유지하고 시공간적 넓은 범위의 스트레스에 저항력이 있는 상태”로 정의되었다 (Rapport 1998; Epstein 1999; 김 등 2007a). Constanza (1992)는 생태계의 건강은 항상성, 안정성과 회복성, 성장과 활성, 균형성 등의 요소에 초점을 두고 이들을 잘 대변하는 적절한 지표가 요구된다고 언급하였고, Jørgense (2005)는 건강성 평가를 위한 지표의 선별요건은 1) 생태계 구

* Corresponding author: Young Ok Kim, Tel. 055-639-8520, Fax. 055-639-8509, E-mail. yokim@kordi.re.kr

조와 기능에 관련성이 있어야 하며, 2) 각각의 항목을 조합하여 통합적으로 선별되어야 하며, 3) 공인된 기준을 갖춘 가이드라인에 의해 선별되어야 한다고 언급하고 있다.

연안해역은 지구촌 인구의 60~70%가 거주하고 있으며 인간 경제활동의 긍정적인 결과와, 개발의 가속화로 생태계 교란 및 오염원의 확산이라는 부정적인 결과를 동시에 초래할 수 있는 곳으로 해양생물과 인간, 양자가 모두 건강한 상태를 유지할 수 있도록 연안해역을 관리하는 것이 중요하다. 이와 같이 연안역의 생태계를 위협하는 다양한 오염원의 압력에 대응하는 종합적인 평가 기법이 국내에서도 절실히 요구된다. 지금까지 국내에서는 해양환경오염의 지표로 사용하고 있는 것은 화학적 산소요구량(Cheical oxygen demand: COD)을 근거로 평가하고 있으나, 이 기준은 수질의 등급과 목표를 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 결론적으로 현재 우리나라에서는 해양 생태계의 건강도를 종합적으로 평가하거나 환경오염의 상태를 공인된 기준을 갖춘 가이드라인에 따라 평가할 수 있는 방법은 없다고 해도 과언이 아니다.

우리나라의 삼면 중 남해역권은 하구와 항만이 발달되어 있으며 임해산업의 집약지로 활발한 경제활동으로 파생되는 인위적 오염 배출원의 영향을 직접적으로 받는 해역이다. 특히 연구해역인 진해만과 마산만은 남해의 대표적인 반폐쇄성 내만으로 만 북부의 마산, 창원, 진해 등과 더불어 남부에 고현 등의 대도시가 발달하고 있다. 그 중 마산만은 폐쇄적인 지형 특성으로 인하여 외해수와의 교환이 거의 없고, 내만에서의 해수 유동속도는 10 cm sec^{-1} 이하로서 육상으로부터 유입된 담수의 체류시간이 10~12시간에 달할 정도로 극히 느리다(이와 권 1994; 임 등 2007). 그 결과 마산만의 수질 오염은 매우 심각한 상황이며, 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 대증식이 연중 발생하고 있고, 특히 여름철 저층에서는 빈산소수괴의 형성이 빈번히 관찰되고 있다(이와 한 2007; 임 등 2007). 진해만 동부해역은 외양으로 연결되는 통로로 해수의 순환이 비교적 원활하며, 마산만과 행암만의 오염원이 빠르게 희석 정화되는 수역이라 할 수 있고, 거제시 칠천도 북서부에 해당되는 진해만 중앙부는 육지와 거리가 있어 오염원의 배출이 낮은 청정 지역으로 구분되며, 남서부해역은 굴, 진주담치, 피조개 등 패류양식이 성행하여 오염물질 축적과 저질환경의 악화로 환경용량을 초과하여 오염이 심화되고 있는 대표적인 해역이다(국립수산진흥원 1991). 결과적으로 진해만 해역은 연안생태계에서 오염 정도에 따른 부유생물의 변화를 감지하고 기초적인 자료를 확보할 수 있는 최적의 장소

라 할 수 있다.

본 연구는 김 등의 2편의 총설 “연안해역 생태계 건강성 평가의 의미와 국내 적용 방향”(김 등 2007a)과 “부유생물을 이용한 해양생태계 건강성 평가”(김 등 2007b)를 바탕으로 오염압력이 큰 해역인 진해만의 생태계 기반 요소를 모니터링하여 해양 생태계 건강성을 평가할 수 있는 부유생물건강지수를 산출할 수 있는 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

재료 및 방법

진해만 광역해역에서 2008년 8월 18일~19일에 걸쳐 총 16정점의 표층수를 채수하여 각각의 항목에 대한 자료를 수집함과 동시에 세키 디스크(Secchi disk)를 이용하여 투명도를 측정하였다(Fig. 1 조사정점 참조). 단, 표층의 용존산소는 대기중에 노출되어 있을 뿐만 아니라 물리적 혼합의 영향으로 정확하게 그 정점을 대표하는 값을 얻기 힘들기 때문에 해저 상부 1m 층에서 채수하여 평가하였다.

수계내 오염원 평가를 위해서 용존유기탄소(Dissolved organic carbon: DOC)와 현재 우리나라에서 해양환경 오염현황의 지표로 사용하고 있는 화학적 산소요구량(COD)을 참고값(Reference value)으로 활용하기 위해서 측정하였다. 용존유기탄소농도는 GF/F여과지(사용전 550°C 에서 5시간 태움)로 여과한 해수 중에 용존되어 있는 유기물을 금속촉매를 이용한 고온 연소장치에 의해 완전히 산화시킨 후 발생하는 이산화탄소의 양을 비분산형 적외선 감지기로 측정하여 정량화하였다(해양수산부 1998). COD는 현장수 250mL를 채수한 후 그 해수시료를 알칼리성으로 하여 강산화제인 과망간산칼륨을 일정량 넣은 다음 일정시간 가열 반응시키고 요오드화칼륨 및 황산을 넣어 남아있는 과망간산칼륨에 의하여 유리된 요오드의 양으로부터 산소량을 측정하였다(해양수산부 1998).

부유생물건강지수 평가를 위해서 엽록소-*a*(Chlorophyll-*a*: Chl.*a*), 종속영양박테리아(HB: Heterotrophic bacteria), 잠재적 유해/유독성 식물플랑크톤(HABs: Harmful algal bloom species), 대장균(*E.coli*)을 조사하였다. 추가적으로 지수로 활용할 수 있는 후보군(자가영양편모충류, 종속영양편모충류, 섬모충, 식물플랑크톤 생물량, 투명도)에 대해서도 검토하였다. Chl.*a* 농도는 표층수 500mL를 선상에서 GF/F필터(ϕ 47 mm Whatman glass fiber filters)로 여과하여, 필터는 Chl.*a* 측정을 위해 15mL 튜브에 넣어 냉동보관 후 여과지를 90% acetone에 넣고 24시간 냉암

소에서 엽록소를 추출한 후 형광측정기(Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 분석하였다. 박테리아의 생물량은 검은색 0.2 µm membrane filter (Millipore)에 glutaraldehyde로 고정된 현장샘플을 일정량(1 mL) 취해 여과후 DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole)로 5분간 염색하여 형광현미경(Axioplane, Zeiss)으로 1,000배 하에서 검경 및 계수했다. 각 샘플은 임의의 시야에서 총 세포수가 300개 이상 계수하여 그에 해당하는 시야수가 전체 시야수에 해당하는 부분을 환산하여 총 박테리아의 생물량을 산출하였다(Porter and Feig 1980). HNF의 생물량은 검은색 1 µm membrane filter (Millipore)에 glutaraldehyde로 고정된 현장수(10~30 mL)를 취해 Primulin 염색후 1,000배 하에서 계수하였다(Caron 1983). 섬모충류와 식물플랑크톤을 정량적으로 분석하기 위해 각각의 500 mL 채수병에 표층수 500 mL를 넣고 곧바로 Lugol과 gluta-

raldehyde로 고정하였다. 그 후 샘플을 50 mL로 농축하여 각 생물군을 동정 및 계수하였다. 대장균(*E.coli*)의 개체수는 현장수 10~50 mL를 0.2 µm membrane filter (사용전 멸균처리한 것)로 여과한 후 그 필터를 3M petrifilm에 35°C 24시간 배양한 후 개체수를 확인하였다.

결과 및 고찰

1. 부유생물건강지수 (PHI: Plankton Health Index)

부유생물건강성 평가는 부유생물 인자들의 기준 농도 등급화를 토대로 4개의 부유생물인자 및 목표치 [*Chl.a* 농도 ≤ 5 µg L⁻¹, 유해성조류 (HABs) ≤ 10⁵ cells L⁻¹, 종속 영양박테리아 (HB) = 2 × 10⁶ cells L⁻¹, 대장균 (*E.coli*) = 1,500 cells L⁻¹]를 통합하여 산출하였고, 부유생물 평가를 위해 설정된 각 부유생물 요소들의 기준 농도, 점수표 (Score) 및 등급화 (Grade)하였다 (Table 1).

먼저 *Chl.a* 지표를 선정할 이유에 대하여 간단히 요약하면, 광합성을 하는 모든 식물플랑크톤(혼합영양생물 포함)은 *Chl.a* 색소를 보유하고 있고, 그 값은 적조와 같은 식물플랑크톤의 이상증식을 표현함과 동시에 부유생태계의 항상성을 유지하는 근간이 되는 일차생산력을 표현할 수 있기 때문에 중요하다. *Chl.a* 농도의 목표치는 진해만 최근 10년간의 계절에 따른 *Chl.a*의 DB (Data base)를 사용하여 그 값을 로그로 변환하여 표준점수 (Z-score)로 계산한 후 정규분포화시켰다(김 2009). 그 결과 표준점수가 0에서 *Chl.a*의 농도값이 4.95 µg L⁻¹, 표준점수가 -1에서는 1.62 µg L⁻¹, +1에서는 15.12 µg L⁻¹의 값을 각각 산출할 수 있었다. *Chl.a* 농도가 너무 낮으면 연안해역의 생산력이 저하되므로 일차생산성도 동시에 고려하여 해역의 건강성을 위한 목표치를 설정하는 것이 중요하다. 따라서 평균값에 근접하는 표준점수 0의 농도 5 µg L⁻¹을 본 연구의 잠정적 목표치를 설정할 수 있었다.

다음으로 유해성조류 (HABs: 대부분 외편모조류)를 선정하였다. 이들 생물의 출현은 수산물을 독화시키거나 양식 어패류를 폐사시킴으로 인간에게 미치는 유해 가능성을 평가하기 위한 지표로 설정할 수 있다. 진해만은 국

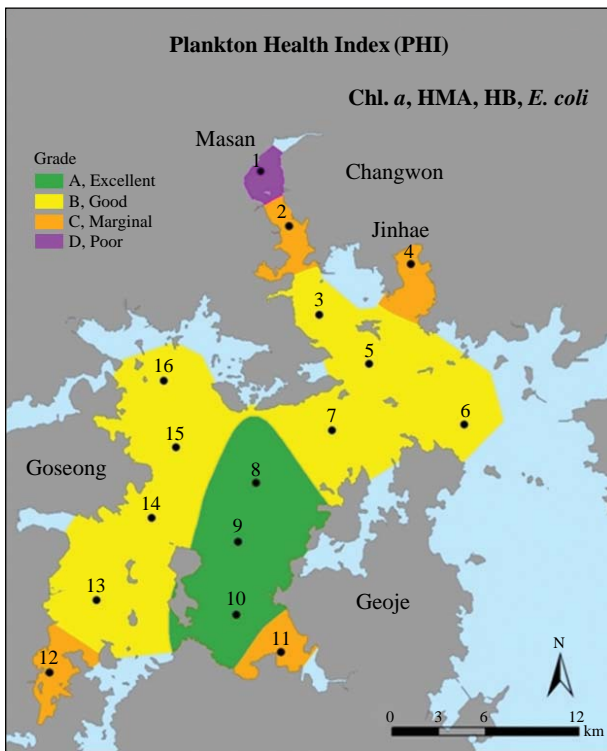


Fig. 1. Map showing the sampling location and results in plankton health index (PHI) at each station in Jinhae Bay.

Table 1. Scoring criteria for planktonic organism index of biotic integrity metrics

	< 0.5 × objective value	0.5 ~ 1.0 × objective value	1.0 ~ 1.5 × objective value	> 1.5 × objective value
Score	1	3	5	7
Grade	A	B	C	D
Number of objective above	0	1 ~ 2	1 ~ 3	2 ~ 4
PHI	4 ~ 12	8 ~ 14	14 ~ 20	20 ~ 28

내에서 유독성 와편모조류의 출현이 가장 빈번한 해역이지만, 선행된 다른 연구는 특성시기에 국한된 자료이기 때문에 상기의 통계학적 접근이 불가능하였다. 따라서 HABs의 개체수와 어패류 폐사와 관련된 기존의 국내외의 생물검정실험 (Algal bio-assay) 연구 결과를 바탕으로 평가하였다 (Schantz *et al.* 1966; Ogata *et al.* 1987; Okaichi 1989; 한 1999; 김 2005). 유해성 미세조류는 종의 특성에 따라 독성의 범위와 위해성의 차이는 있으나 안정성을 고려하여 최소치를 적용하면 그들의 개체수는 10^5 cells L⁻¹의 농도 이상이면 어패류를 치사하거나 폐독의 원인이 됨으로 잠정적으로 이 값을 목표치로 설정하였다.

중속영양박테리아(HB)는 유기오염에 의한 부유생물의 생물학적 평가지표로 활용가능하다. 무기영양염을 이용한 광합성 산물 Chl.a를 지표로 평가했듯이, 유기 오염에 대한 평가 지표가 필요하다. 일반적으로 유기물의 농도가 높으면 중속영양박테리아의 증식이 빨라지고 이와 연관된 미세생물고리 (Microbial loop)가 발달된다 (Azam *et al.* 1983). 미세생물고리 내 부유생물의 주요 구성요소는 중속영양박테리아, 중속영양미소편모류, 섬모충으로 이 중 중속영양박테리아는 유기물을 직접 이용하며 편모류나 섬모류에 비해서 분석법이 용이한 장점이 있다. 이것은 다음 단락에서 편모류 (HNF)나 섬모류 (Ciliate)에 관해서 언급하고 지표로 활용가능한지 검토할 것이다. 중속영양박테리아의 목표치에 관해서도 Chl.a의 지표설정과 동일한 방법으로 진해만에서 측정된 그들의 밀도를 정규분포로 표현하여 표준점수 0에 해당하는 HB의 밀

도는 1.9×10^6 cells mL⁻¹로 산출되었다. Chl.a 농도의 지표에서 언급한 것과 같이 유기물을 흡수하여 일차생산성을 유지하는 것과 같은 맥락으로, HB는 유기물을 분해하여 얻은 에너지를 부유생태계 내의 상위단계로 전달함으로써 해양생태계 저차생산성의 근간을 형성함으로써 저밀도의 HB보다 평균치에 근접하는 표준점수 0에 해당되는 밀도 2.0×10^6 cells mL⁻¹을 잠정적 목표치로 설정하였다.

대장균 (*E.coli*)은 유기물 오염의 심화지표로 활용가능하다. 무기오염은 부유생태계에 적조라는 이상증식을 표출하고, 적조는 인간활동에 직접적 위해를 끼치고 있다. 이와 같은 맥락으로 유기오염은 부유생태계에 박테리아 이상증식과 빈산소 수괴를 형성하며, 박테리아 중 인간에게 직접적 위해를 가하는 병원성 비브리오 균과 육상오수의 유입을 암시하는 대장균을 지표로 이용할 수 있다. 이들 중 병원성 비브리오 균의 검출법은 고도의 전문성이 요구되며 실용성의 문제가 대두되어 상대적으로 접근이 용이한 대장균을 심화지표로 선별할 수 있다. 현재 국내의 해양환경기준의 대장균수는 일본에서 적용하는 기준치를 차용한 생활환경 1등급 1,000 MPN/100 mL 이하로 명시되어 있다. 중국에서는 해수수질의 지표로 분변성 대장균수를 2,000 cells L⁻¹ 미만으로 설정하고 있고, 호주의 경우 Moreton Bay에서 수영이 가능한 수질 기준치를 1,500 cells L⁻¹로 정하고 있다. 국내의 경우 대장균 개체수가 해역수질의 평가항목에 들어있으나 실제 해양환경의 연구 및 평가결과를 통한 자료수집의 한계성 때문에 통계분석의 어려움이 있어 현 지점에서는 목

Table 2. Results in planktonic organism index of biotic integrity metrics at each station in Jinhae Bay in August, 2000

	Chl.a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	HABs (cells L ⁻¹)	HB (cells L ⁻¹)	<i>E.coli</i> (cells L ⁻¹)	Number of excess objective value	Index (WQI)	Grade
1	11.68	79467	4501720	1000	2	20	D
2	6.86	48250	3606029	600	2	16	C
3	3.00	28518	3809595	0	1	12	B
4	4.98	55978	3454809	0	2	16	C
5	2.00	31122	5118235	0	1	10	B
6	2.56	12005	3557561	0	1	10	B
7	1.67	24500	3669038	0	1	10	B
8	1.03	2794	1058459	0	0	6	A
9	1.49	8773	1904798	300	0	6	A
10	1.23	4592	1788474	1000	0	8	A
11	5.14	8464	3118924	0	2	14	C
12	1.69	2077	2207239	2000	2	14	C
13	1.01	902	3101961	0	1	10	B
14	1.09	9444	2838294	0	1	8	B
15	1.09	7280	3891991	0	1	10	B
16	2.86	17664	3019565	0	1	10	B
AVE	3.09	21364.39	3165418.25	306.25	1.13	11.25	B

Table 3. Results in transparency, dissolved organic carbon (DOC), chemical oxygen demand (COD), autotrophic nano-flagellate (ANF), heterotrophic nano-flagellate (HNF) and ciliate in Jinhae Bay from 18 to 19 August 2007

Station	Transparency m	DOC cells mL ⁻¹	COD mg mL ⁻¹	ANF cells mL ⁻¹	HNF cells mL ⁻¹	Ciliate cells L ⁻¹
1	1.0	2.51	7.33	5612	2338	28100
2	2.3	1.58	5.67	2619	1590	88300
3	3.3	1.83	5.67	619	928	64100
4	2.5	3.25	7.33	2385	1824	11700
5	4.1	0.02	5.33	675	1754	17900
6	4.0	0.11	6.00	1247	78	11400
7	5.4	0.67	5.67	585	234	20100
8	6.5	2.43	7.00	809	135	10400
9	5.3	2.02	5.33	818	1502	28500
10	6.0	0.13	5.83	631	561	12400
11	3.5	2.52	6.33	2017	526	30400
12	6.5	9.56	3.67	1894	772	12500
13	8.0	5.85	1.83	601	869	21100
14	7.0	3.55	2.40	1052	526	10300
15	6.5	2.29	2.67	869	735	7500
16	5.5	1.95	2.93	702	468	12300
AVE	4.84	2.52	5.06	1446	928	24188

표치를 호주에서 수영을 할 수 있는 기준인 1,500 cells L⁻¹ 미만을 이용하여 평가하였다.

상기에 언급한 4가지의 부유생물지표를 선정하여 각 항목에서 설정한 목표치를 바탕으로 목표치 초과 횟수와 그 범위를 점수화하여 등급화한 것을 Table 1에 나타내었다. 또한 지수 산정을 위해 목표치 초과 수준에 따른 점수를 산정하여 합산한 값을 지수로 표현하였으며, 각 지표 측정치의 초과 정도에 따라 차별하여 각각의 색으로 표현하였다(Table 2). 부유생물건강지수(PHI)의 값은 4~28 사이의 범위로 설정하였으며, 지수가 낮으면 건강하며 높을수록 불건강 성향이 커진다. Table 1과 2를 근거로 하여 정점 1의 경우의 예를 들면, Chl.a: 7점, HABS: 3점, HB: 7점, 대장균: 3점을 합하면 20점이 된다. 이 점수는 PHI지표의 20~28점에 해당되는 D등급으로 마산만 내측의 정점 1 부유생물지수는 “나쁨”으로 건강성 평가를 할 수 있다. 이와 같이 진해만 각 정점의 모니터링한 자료에 대입하여 부유생물지수를 산출하였다(Fig. 1). 그 결과 마산만 최 내측 정점 1에서 최고 PHI=20점이 산출되었고, 반대로 진해만 중앙수역인 정점 8과 9에서는 PHI=6점으로 가장 건강한 상태로 평가되었다. 지수 값의 범위를 구분하여 부유생물 건강성을 등급으로 표현하면 정점 1은 D등급으로 가장 낮았으며, 다음으로 정점 2와 행암만 정점인 4, 고현만 정점 11, 통영의 원문만 정점 12에서 C등급으로 구분되었다. A등급의 수역은 설정한 각 지표에 목표치를 초과한 적이 없었던 정점 8, 9, 10으로 진해만 중앙해역에 집중되었다. C등급의 수역은 차후 건강성 악화의 소지가 충분한 수역으로 정

기적인 감시가 요구된다. 특히 D등급을 받은 마산만 최 내측해역은 건강을 악화시킨 문제의 지표는 Chl.a와 HB로 이 두 지표의 값은 목표치의 2배 이상을 초과하였으며 향후 마산만 내측의 부유생물 건강성 회복을 위해 두 생물 지표의 압력원이 되는 DIN, DIP 및 DOC의 농도를 감소시키는 관리방안이 연계되어야 한다. 결론적으로 하계 진해만 전해역을 대상으로 한 부유생물지수의 통합점수는 11.25로, 목표치 초과횟수가 평균 1.13회로 B등급으로 구분되었다.

2. 미소생물고리

부유생물구성원은 수질과 밀접한 분포를 보이고 있기 때문에 유기/무기 오염원에 따른 미소생물그룹의 반응에 초점을 둔 해양환경 평가가 병행되어야 오염원과 미소생물그룹과의 관계를 정확히 파악할 수 있다. 미소생물환 구성원 간의 피포식 관계를 파악하기 위해서 진해만 16개 정점에서 용존유기탄소(DOC), 종속영양박테리아(HB), 자가영양편모충(ANF), 종속영양편모충(HNF), 섬모충의 개체수 변동을 알아보았다(Table 3). DOC 농도는 마산만 내측에서 2 mg L⁻¹ 전후의 농도를 보였고, 진해만 중앙해역에서는 낮게 검출되었다. 특히 진해만 서부해역의 정점 12에서 최고치 9.56 mg L⁻¹를 기록한 후 정점 16으로 향하면서 점차적으로 감소하는 양상을 보였다. HB는 마산만 내측과 외측을 중심으로 한 정점 1~7 사이에 현저히 높은 값을 유지하였고, 정점 5에서 최고값 5.1 × 10⁶ cells mL⁻¹을, 정점 8에서 최저값 1.0 ×

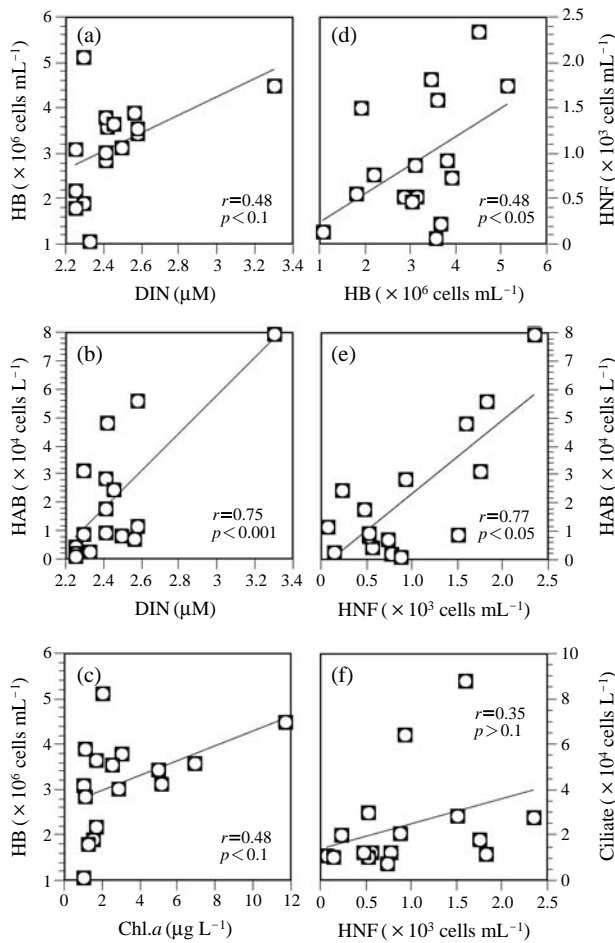


Fig. 2. Relationships between HB and DIN (a), between HABs and DIN (b), between HB and Chl.a concentration (c), between HNF and HB (d), between HAB and HNF (e) and between HNF and ciliate (f). HB: heterotrophic bacteria, DIN: dissolved inorganic nitrogen, HABs: harmful algal bloom species, HNF: heterotrophic nano flagellates.

10^6 cells mL^{-1} 을 기록하여 5배의 높은 차이를 보였다. ANF는 정점 1을 중심으로 높은 밀도로 출현하였고, 그들의 출현은 높은 무기영양염과 관계가 있을 것으로 사료되었다. HB의 먹이원에 반응하여 성장하는 HNF의 개체수 변동은 마산만 내측에서 높은 밀도를 보였고, 진해만 중앙부와 서남부해역에서는 상대적으로 낮게 나타났다. 섬모충류의 개체수는 먹이원이 풍부한 정점 1에서 낮게 나타났으나, 인접한 정점 2와 3을 중심으로 높은 밀도의 개체수 ($60\sim 80$ cells mL^{-1})를 보였다. 이들 두 정점의 개체수는 다른 정점과 비교하였을 때 약 3~10배 정도 높았다. HB가 용이하게 활용하는 유기오염원은 용존 유기탄소(DOC)이며 이를 근간으로 하여 HB가 이용하고, 또 그 HB를 HNF가 섭식하며, 그것은 다시 섬모충류에 의해 포식되는 부유미소생물 구성원의 에너지 흐름

이 시작된다(Azam *et al.* 1983). 본 조사에서 HB와 DOC의 상관성($r=0.28$, $p>0.1$)은 관찰할 수 없었으나, HB는 무기오염원인 DIN과 Chl.a 농도와 낮은 상관성을 보였다($r=0.48$, $p<0.1$; $r=0.45$, $p<0.1$)(Fig. 2a, c). 특히 DOC 농도는 진해만 서부해역 통영(원문만)에서 고성으로 향하는 라인에서 점차적으로 높게 나타났다(Table 3). 이곳은 굴, 진주담치, 피조개 등 패류양식이 성행하여 오염물질 축적과 저서환경의 악화로 환경용량이 초과하여 오염이 심화되고 있는 해역이다(국립수산진흥원 1991). 이들 지역은 진해만 16정점 중 가장 낮은 Chl.a 농도가 관찰되었음에도 불구하고 가장 높은 DOC 농도가 관찰되었다는 것은 Chl.a 기원으로 발생하는 유기오염물(DOC)이 아닌 양식으로 인하여 생성되는 다른 부산물의 영향이 높았다고 생각된다.

영양염 재순환과 미소생물 먹이 흐름의 중간 매개체 역할을 담당하는 생물은 HNF이다. HNF는 포식성 식물플랑크톤(Mixotrophic and Heterotrophic dinoflagellate) 뿐만 아니라 섬모충의 먹이원으로 물질 순환의 연결고리로서 중요한 위치를 차지한다. 본 조사에서 HNF는 그들의 먹이원인 HB와는 유의한 상관성을 보였고($r=0.48$, $p<0.05$), 포식자인 유해/유독성 와편모조류(HABs)와도 유의한 높은 상관성을 나타내었으나($r=0.77$, $p<0.05$), 섬모충류와는 유의한 관계를 나타내지 못했다($r=0.35$, $p>0.1$). 건강성 평가를 위한 부유생물의 평가 지표로 활용하기 위해서는 유·무기오염원과 생물 간의 상관성 뿐만 아니라 복잡 다양한 먹이흐름의 관계에 있어서도 그들의 생물과 반응을 파악하기 위해서 각 생물 간의 상관성이 필수적이다. 본 연구에서는 이들 생물 간의 상관성이 뚜렷하게 관찰되지 않아 지표로 활용하지 못한 항목에 관해서, 차후 이들 생물군(HNF, 섬모충류)의 타당성을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

3. 부유생물 건강성 평가를 위한 추가지표 검토

수서환경의 건강성 평가를 위한 생물모니터링은 주로 어류와 저서생물 군집을 기반으로 행하였다. 국내에서도 하천과 호소에서는 이와 유사한 방법으로 평가하고 있고(안과 김 2005; 권과 안 2006; 이 등 2007), 해양에서는 저서생물을 이용하여 건강성 평가를 하고 있다. 국외에서는 부유생물을 이용하여 다변수 메트릭을 세워 해역의 건강성을 평가한 사례가 있다(Buchanan *et al.* 2005; Lacouture *et al.* 2006). 그들이 제시한 Chesapeake Bay의 건강성 평가를 위한 부유생물의 지표 산출은 계절별로 차별성이 있고, 지표로는 투명도(Transparency or Secchi depth), Carbon: Chl.a, 표층의 Chl.a량, 각 계절별로 우점

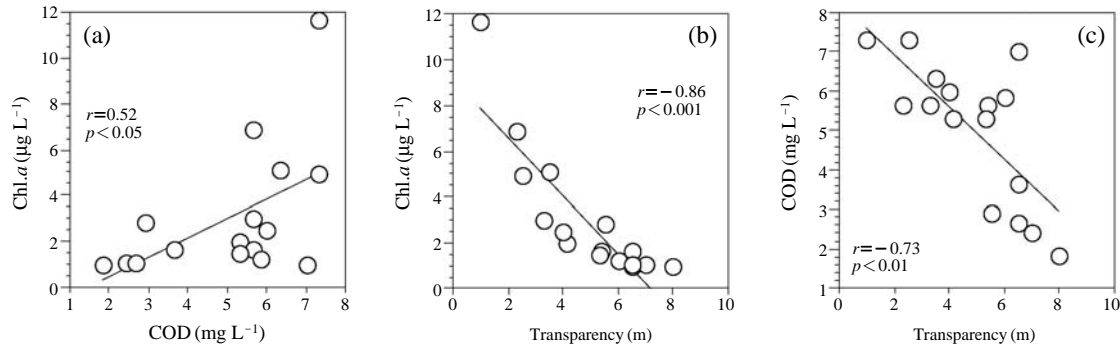


Fig. 3. Relationships between Chl.a concentration and COD (a), between Chl.a concentration and transparency (b) and between COD and transparency (c). COD: chemical oxygen demand.

종의 개체수 밀도, Nano-micro 생물량, 규조류 생물량, 와편모조류 생물량, 은편모조류의 생물량 등으로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서도 우리나라에서 해양환경 오염현황의 지표로 사용하고 있는 화학적 산소요구량(COD)을 참고값(Reference value)으로 활용한 결과, Chl.a 농도와 유의한 정(+)의 관계($r=0.52$, $p<0.001$)를, 투명도와는 부(-)의 관계($r=-0.72$, $p<0.01$)가 성립되었다(Fig. 3). 즉 오염이 진행된 지역은 식물플랑크톤의 현존량을 대변하는 Chl.a 농도가 높고, 이와 반대로 해역의 투명도는 감소한다는 것을 시사할 수 있다. 아울러 Chl.a 농도는 투명도와 강한 부(-)의 관계($r=-0.86$, $p<0.001$)를 보였고, 이것은 오염이 진행되면 일차적으로 반응하는 식물플랑크톤의 현존량이 높아진 결과 빛이 투과하는 양은 감소하여 투명도가 낮게 유지되었다. 결과적으로 본 연구에서 투명도는 건강도 지수를 산출하는 지표로 활용하지 않았지만, 추후 평가시에는 검토하여도 될 것으로 판단된다. 차후 국외의 사례를 응용하여 오염원에 반응하는 부유생물군의 현존량과 각 생물군의 비를 산출하여 건강도를 평가하고자 한다.

요약하면 진해만 해역에서 부유생물을 이용하여 건강성을 평가한 값과 현재 우리나라에서 사용하고 있는 해양환경 오염현황의 지표로 삼는 화학적 산소요구량 COD와 비교해 보았다. COD값은 정점 1~11(그 중 1, 4, 8 정점은 7 mg L^{-1} 이상)까지 5 mg L^{-1} 이상의 높은 값을 보인 반면, 정점 12~16에서는 상대적으로 낮게 나타났다. 특히 건강도지수 평가에서 A와 B등급의 양호한 평가를 받은 정점에서 COD값이 높게 나타나는 등 상호요인 간의 차이를 확인할 수 있었다. 부유생물은 수중의 환경과 밀접한 관계를 맺고 있는 생물군으로 고려할 때 COD값은 오염원에 반응하는 생물을 평가하지 않은 결과 이와 같이 다른 경향이 관찰되었다고 사료된다. 차후 상기의 항목을 충분히 고려하여 지표에 추가하는 것과

더불어 각 지표로부터 얻어진 지수값에 가중치를 부여하는 등의 방법을 모색하여 해양생태건강도를 산출하는 통합지수가 필요하다.

적 요

하계 진해만 16개의 정점에서 해양생태계의 오염 정도를 평가하기 위해서 플랑크톤 건강 지수를 살펴보았다. 해양생태계 건강지수 산출은 부유성 플랑크톤 생물 엔테로박테리아 *Escherichia coli*, HB, ANF, HNF, HABs 그리고 섬모충류 등과 더불어 무기와 유기 오염원인 DOC, COD, 그리고 Chl.a 등을 각각 조사하였다. 그 중 플랑크톤 지수 산출은 오염압력의 반응에 민감한 Chl.a, HABs, HB, *E. coli* 등 4개의 지표를 시범적 선정하였다. 또한 점수산정기준은 과거자료를 바탕으로 통계학적 기법으로 해석하였으며, 그들 건강지수 등급도 4개로 나누었다. 그 결과 진해만 해역은 전반적으로 “좋음”의 B등급을 받았다. 본 연구에서 산출한 플랑크톤 건강지수는 진해만의 해양생태계 건강성 평가를 하기 위한 좋은 방법 중 하나로 고려하여도 될 것이다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 연구과제 “남해특별관리해역의 관리를 위한 해양 생태계 건강지수 개발(PE98463)”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

국립수산진흥원. 1991. 연안 양식어장 환경용량 산정에 관

- 한 연구.
- 권영수, 안광국. 2006. 금호강 수계에서 생물학적 하천 건강도 및 이화학적 특성. 한국육수학회지. 39:145-156.
- 김영옥. 2009. 해양생태계 건강지수 개발을 위한 기획연구. 한국해양연구원 보고서. 121pp.
- 김영옥, 심원준, 염기대. 2007a. 연안해역 생태계 건강성 평가의 의미와 국내 적용 방향. Ocean Polar Res. 29:319-326.
- 김영옥, 최현우, 장민철, 장풍국, 이인제, 신경순, 장 만. 2007b. 부유생물을 이용한 해양생태계 건강성 평가. Ocean Polar Res. 29:327-337.
- 김학균. 2005. 해양적조. 다솜출판사. 466pp.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가기법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지. 38:361-371.
- 이의행, 최지웅, 이재훈, 안광국. 2007. 어류모델 메트릭, 물리적 서식지 변수 및 수질특성 분석에 의한 섬진강의 생태 건강성 진단. 한국육수학회지. 40:184-192.
- 이주연, 한명수. 2007. 마산만 식물플랑크톤의 대발생 양상의 변화와 군집동태. 한국해양학회지-바다. 12:147-158.
- 이찬원, 권영택. 1994. 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링. 경남대학교 환경문제연구소 보고서. 264pp.
- 임동일, 김영옥, 강미란, 장풍국, 신경순, 장 만. 2007. 한국 남해 마산만에서 수질환경의 계절적 변동과 기초생산 제한인자. Ocean Polar Res. 29:349-366.
- 한명수. 1999. 유독 플랑크톤에 의한 연안역 폐류 독화 및 확산 예측. 해양수산부. 238pp.
- 해양수산부. 1998. 해양환경공정시험법. 해양수산부고시 제 1998-4호. 316pp.
- Azam F, T Fenchel, JG Field, JS Gray, LA Meyer-Reil and F Thingstad. 1983. The ecological role of water column microbes in the sea. Mar. Ecol. Prog. Ser. 126:97-102.
- Buchanan C, RV Lacouture, HG Marshall and M Olson. 2005. Phytoplankton reference communities for Chesapeake Bay and its tidal tributaries. Estuaries 28:138-159.
- Caron DA. 1983. Technique for enumeration of heterotrophic and phototrophic nanoplankton, using epifluorescent microscopy, and comparison with other procedures. Appl. Environmental Microb. 46:491-498.
- Costanza, R. 1992. Toward an operational definition of ecosystem health. pp.236-253. In Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management (Costanza R *et al.* eds). Island Press, Washington, D.C.
- Epstein PR. 1999. Large marine ecosystem health and human health. pp.417-438. In The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem: Assessment, Sustainability, and Management. Blackwell Science, Boston, MA.
- Jørgense SE, FL Xu, F Salas and JC Marques. 2005. Application of indicators for the assessment of ecosystem health. pp.5-66. In Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health. CRC Press, Florida.
- Kamphake L, S Hannah and J Cohen. 1967. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. Water Res. 1:205-216.
- Lacouture RV, JM Johnson, C Buchanan and HG Marshall. 2006. Phytoplankton Index of biotic integrity for Chesapeake Bay and its tidal tributaries. Estuaries and Coast 29:598-616.
- Ogata T, T Ishimaru and M Kodama. 1987. Effect of water temperature and light intensity on growth rate, and toxicity change in *Protogonyaulax tamarensis*. Mar. Biol. 95:217-220.
- Okaichi T. 1989. Red tide problems in the Seto Inland Sea, Japan. pp.137-142. In Red Tide Biology, Environmental Science, and Toxicology (Okaichi T, DM Anderson and T Nemoto eds.). Elsevier, NY.
- Poter KG and YS Feig. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. Limnol. Oceanogr. 25:943-948.
- Rapport DJ. 1998. Dimensions of ecosystem health. pp.34-40. In Ecosystem Health. Blackwell, Oxford.
- Schantz EJ, JM Lynch, G Vayvada, K Matsumoto and H Rapport. 1966. The purification and characterization of the poison produced by *Gonyaulax catenella* in axenic culture. Biochemistry 5:1191-1195.

Manuscript Received: July 16, 2010
 Revision Accepted: August 10, 2010
 Responsible Editor: Hyun-Woo Kim