해역의 환경특성을 고려한 해양환경 기준설정과 수질등급 평가

노태근¹ · 이동섭^{1,*} · 이상룡¹ · 최만식² · 박 철² · 이종현³ · 이재영⁴ · 김성수⁵

¹부산대학교 해양연구소/해양학과

²충남대학교 해양환경과학과

³네오엔비즈

⁴국토해양부 해양생태과

⁵해양환경관리공단 기후수질팀

Reference Values and Water quality Assessment Based on the Regional Environmental Characteristics

TAE KEUN RHO¹, TONG SUP LEE^{1,*}, SANG RYONG LEE¹, MAN SIK CHOI², CHUL PARK², JONG HYUN LEE³,
JAE YOUNG LEE⁴ AND SEUNG SU KIM⁵

¹Marine Research Institute/Department of Oceanography, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Oceanography&Ocean Environment Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Neo Environmental Business Co, Gyeonggi-Do 420-806, Korea

⁴Marine Ecosystem Division, The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Gyeonggi-Do 427-712 Korea

⁵Climate&Marine Environment Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 135-870, Korea

육상기인 오염원의 해양유입의 급속한 증가로 인해 유해성 적조발생이 빈번해졌을 뿐 아니라, 양식기술의 발달과 과밀양식으로 인해 연안역의 자가 오염증가가 가속화되고 있다. 따라서 해양환경 관리와 적절한 해역이용을 위해 과학적인 관리의 필요성이 증가하고 있다. 현행 환경기준은 일본의 해역 수질기준을 준용하여 육상의 배수기준에 희석 비율을 적용시켜 설정하는 공학적인 방식이다. 그리고 해역의 환경특성을 고려하지 않고 일률적인 값을 적용하였다. 유럽연합, 미국, 호주, 캐나다 등의 선진국에서는 이미 20여 년 전부터 종합적인 수질관리대책을 마련하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 해양환경 특성에 적합한 수질평가 기준을 설정하기 위해 해역을 해류, 조석, 탁도 등을 기준으로 다섯 가지의 생태구로 구분하였다. 그리고 국가해양측정망의 관측항목 중에서 부영양화의 원인항목(용존 무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN), 용존 무기인(dissolved inorganic phosphorus, DIP)과 일차반응항목(클로로필, Secchi depth)과 이차반응항목(저층용존산소포화도, bottom dissolved oxygen saturation)에 해당하는 항목들을 평가항목으로 선정하였다. 용존 무기질소, 용존 무기인과 클로로필의 기준값은 각각의 생태구에서 하천의 유입 영향이 최소인 외양역 정점의 2000년에서 2007년까지의 계절별 평균값 중 최대값으로 하였고, Secchi depth는 계절별 평균값 중 최소값을 선택하였다. 그리고 저층용존산소 포화도는 외양역의 평균값 중 최소포화도 값인 90%를 전체 생태구의 기준값으로 정하였다. 전체연안을 체계적이고 동일한 기준으로 관리하기 위해서 개별 평가항목의 점수로부터 원인항목, 일차반응 항목, 이차반응 항목 순으로 큰 가중치를 부여하는 가중선형합산 방식으로 수질지수를 계산하였다. 2000년부터 2007년까지 모든 정점에서 구한 수질지수의 분포는 최소값인 20과 중앙값이 30에서 빈도수가 높은 쌍봉분포가 나타났다. 따라서 수질지수의 쌍봉분포 앞부분에 해당하는 23이하를 매우좋음(I등급)으로 하였고 최소값+표준편차 이하를 좋음(II등급), 최소값+2표준편차 이하를 보통(III등급), 최소값+3표준편차 이하를 나쁨(IV등급), 그리고 최소값+3표준편차 초과일 때 아주나쁨(V등급)으로 정하였다.

For the development of reference values and evaluation of water quality in various environmental conditions, we divided the coastal region around Korean peninsular into 5 distinctive ecological regions based on the influence of surface current, depth, tidal range, turbidity, and climate condition. We used national marine environment monitoring data collected by National Fisheries Research & Development Institute(NFRDI) from 2000-2009. For the reference values, we used maximum seasonal mean from 2000 to 2007 for DIN, DIP, and chlorophyll-a and minimum seasonal mean for secchi depth measured at stations without the influence of river runoff in each ecological regions. For the reference value of bottom dissolved oxygen saturation, we used minimum mean value of 90% calculated from minimal riverine influence stations of whole regions. We calculated enrichment score for each assessment criteria. The enrichment score of DIN, DIP, and Chlorophyll-a was 1 (= reference value), 2 (< 110% of reference value), 3 (< 125% of reference value), 4 (< 150% of reference value), and 5

*Corresponding author: tlee@pusan.ac.kr

(> 150% of reference value). The enrichment score of DO saturation and Secchi depth was 1 (> reference value), 2 (> 90% of reference value), 3 (> 75 % of reference value), 4 (> 50% of reference value), and 5 (< 50% of reference value). We calculated water quality index using weighted linear combination of five enrichment score for the comparison of whole regions. From the water quality index distribution calculated from all stations between 2000 and 2007 period, we classified into 5 grade based on the standard deviation calculated from total water quality index. We assigned grade very good(I), good(II), moderate(III), bad(IV), and very bad(V) when the water quality index was less than 23, minimum + 1 sd, +2 sd, +3 sd, and grater than minium+ 3 sd, respectively.

Key words: Eutrophication assessment, Water quality index, Reference values, DO saturation, Chlorophyll-a, Secchi depth, DIN, DIP

서 론

지난 20여 년간 연안이용의 급격한 증가로 인해 육상기인 오염원의 해양유입의 급속한 증가로 인해 연안역의 유해성적조 발생이 빈번해졌다. 또한 다양한 양식기술의 발달과 과밀양식으로 인한 자가 오염증가가 가속화됨으로 인해 잠재적인 오염해역이 증가하고 있어 해양환경관리와 적절한 해역이용을 위한 과학적인 관리의 필요성이 증가하고 있다. 현재 해양환경관리를 위한 수질평가는 pH, COD, DO, SS, TN, TP등의 6개 항목이다. 이들의 해역별 수질평가는 해양환경 특성을 고려하지 않고 획일적인 평가기준을 적용하여 3개의 등급으로 구분하고 해역의 용도를 각각의 등급에 따라 규정하여 관리하는 기준으로 삼고 있다. 또한 현행 수질기준 평가방법의 체계는 각각의 항목에 대해 개별적인 등급으로 구분된다. 그래서 같은 지역이라도 평가항목에 따라서 수질등급이 다르게 나타나는 경우가 있어 관리자가 적절한 수질관리 대책을 수립하는데 어려움이 있다.

또한 현재 환경기준은 전반적으로 일본의 해역 수질기준을 준용하여 사용하였는데, 일본의 해역 수질기준은 육상의 배수기준에 희석 비율을 적용시켜 설정하는 공학적인 방식을 사용하였다. 그러나 해양은 하천과 호소와 달리 수체의 물리, 화학, 지질환경이 매우 다양하여 외부로부터 영향에 대한 반응이 수체마다 다르게 일어난다(NRC 2000). 따라서 해양환경 특성을 고려한 수질평가 기준을 설정하고 개별적인 항목에 대한 수질평가 결과를 통합하는 지수를 개발하여 통합적인 해역관리 대책을 수립 할 요구가 증대되고 있다.

유럽연합, 미국, 호주, 캐나다 등의 선진국에서는 이미 20여 년 전부터 종합적인 수질관리대책을 마련하기 위한 노력들이 진행되고 있다(EPA 2001; AWQG 2000; EHMP 2008). 그리고 국내에서도 해양관련 정보를 조직화, 단순화, 그리고 일반화를 위한 국가해양지수 개발의 필요성을 역설하였다(한국해양연구원 2007). 나아가 해양환경을 생태계중심으로 생물요소(부유생물, 저서생물, 바이오마커)와 화학요소(수질과 퇴적물)로 구분한 해역환경의 생태계 건강성평가를 위한 예비지표 선별과 타당성 검토에 대한 연구가 진행되었다. 추가적으로 한국연안 표층수의 chlorophyll-a, 용존 무기질소, 용존 무기인 자료들을 해역별(동해, 남해, 서해)로 구분하여 다른 기준을 설정하고 계급구간을 이용하여 등급을 결정하는 방법을 제시하였다(한국해양연구원 2007). 그리고 임 등(2011)은 한국 연안역 수질 성분들(COD, DIN, DIP, chlorophyll-a)등의

해역별 농도특성에 대한 통계적 접근을 통해서 등급화를 시도하였다. 이들의 방법은 기존의 방법에 비해 상당히 진일보한 면이 있으나 개별항목에 대한 평가결과를 통합하는데 있어서 개선의 여지가 있다.

따라서 본 연구에서는 종합적인 해역평가를 위해 우선 우리나라 해양환경 특성에 적합한 수질평가 기준을 설정하기 위해 해역구분, 수질평가 항목의 선정, 해역별 수질평가 기준값, 항목별 평가를 통한 점수화, 수질지수를 계산하여 개별 정점에서 수질등급을 결정하는 방법을 제시하였다.

재료 및 방법

부영양화 평가를 위한 기준설정을 위해서 사용된 자료는 국립수산과학원에서 측정한 국가해양환경 측정망자료를 이용하였다(<http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>). 기준값 설정을 위해서 2000년부터 2007년까지의 2월, 5월, 8월, 11월의 자료를 생태구로 나누어 각각의 정점별로 정리하고 다시 월별로 정리하였다. 그리고 같은 기간 동안 국립수산과학원의 정선 관측자료(http://kodc.nfrdi.re.kr/page?id=obs_04_01) 중 각각의 생태구에 해당하는 가장 내측의 2개의 정점의 염분자료를 이용하여서 외해에서 유입되는 해수의 자연적인 염분변동을 계산하였다. 8년간의 국가해양환경 측정망 자료로부터 도출된 기준과 평가 방법을 2009년도 국가 해양환경 측정망 자료에 적용하였다.

결과 및 토의

해역구분

새로운 수질평가의 특징은 기존의 평가방법에서 해역의 특성을 고려하지 않고 일률적인 평가기준을 적용하여 해양환경수질을 평가하는 방법과 달리 해역의 특성에 맞는 평가기준을 제시하는 것이다. 새로운 방식을 적용하려면 우리나라 연근해역을 해양환경의 특성을 고려하여 생태관점에서 분류가 선행되어야 한다. 해역의 특성을 고려한 해역구분을 위해서 다양한 방법들이 제시되고 있다(Madden *et al.* 2005). 생태계를 생물 지리적 기술자로 구분하는 가장 큰 단위는 생태구역(Ecological Region)이다. 생태구역은 비교적 균질한 물리와 생물변수들을 가지고 기후, 해류나 분지와 같은 물리 체계, 독특한 생물상으로 되어 있다. 따라서 큰 해역, 해류로 경계를 지은 해수면 온도가 비슷하거나 얼음으로 덮힌 지

Fig. 1. Map showing the five distinctive ecological regions based on environmental characteristics of the region: (1) East Sea Ecoregion (water column depth, Geojin~Youngil), (2) Korea Strait Ecoregion (Current, Guryounpo~Yeosu), (3) western South Sea Ecoregion (turbidity, Gamak~Jeonjupo), (4) central West Sea (tide height, Gunsan~Incheon), (5) Jeju Ecoregion (climate, Jeju~Hanrim).

역 등을 써서 나뉘게 된다. 생태구역의 공간규모는 거리로 100 km에서 1000 km, 면적으로는 100 km²에서 1,000 km²에 이른다. 우리나라는 전통적으로 동해, 남해, 서해로 나뉘어 졌으나 본 연구에서는 수심, 동한난류 영향, 조석의 특징에 의해 한국연안 해역을 다섯 개 생태구로 구분하였다(Fig. 1). 개별 생태구의 특징은 다음과 같다.

동해 생태구: 동해 생태구는 우리나라 해역에서 유일한 심해역인 울릉분지에 접한 곳으로 설정하였다. 따라서 1차 분류자는 수심인데 외양의 수심이 500미터 이상이 되는 곳을 선정하였으며, 구룡포 이북의 동해 연안이 이 생태구에 속한다. 이 생태구는 저층에 존재하는 냉수(15℃ 이하)의 영향을 받는 것이 가장 두드러진 특징이다. 따라서 용승은 이 생태구역에서 가장 주목해야 할 해양학적 과정이다. 분류체계에 따르면 영일만으로 담수가 들어오는데 하구만보다는 열려 있으므로 저염역이 되고 나머지는 연안역이 된다. 연안역에서 동한 난류가 연안을 따라 북상하다가 죽변 부근에서 이안하게 되므로 2차 분류자는 해류가 된다. 따라서 죽변을 경계로 연안역은 온수구과 냉수구로 갈리게 된다. 이밖에 울릉분지에 상존하고 있는 시계 방향 와류의 생태적 역할도 중요한 고려 대상이 된다.

대한해협 생태구: 대한해협 생태구는 대마난류와 여기서 파생되는 동한난류의 직접 영향권에 있는 해역으로 설정하였다. 따라서 가장 중요한 분류자는 해류 체계이다. 지리적으로는 구룡포부터 여수반도 서쪽까지로 획정하였다. 동해 생태구에 비해서는 온도가 높고, 이웃한 서남해역 생태구 보다는 탁도가 낮은 특성을 보인다. 이 구역의 한 가운데에는 낙동강이 위치하고 있어서 하구만역을 이루므로 최소한 3개의 역으로 나뉘는데 두 연안역 가운데 동해쪽에 위치한 역은 여름철 남풍 계열 계절풍이 우세할 때 연안 용승이 자주 일어나는 해역이다(You and Park, 2010). 낙동강 하구만역 서쪽은 한려수도라 부르는 대표적인 청정해역이고 따뜻한 수온 특성 때문에 해산 양식이 가장 활발한 곳이다. 따라서 난류와 용승한 찬 해수, 고염수와 육지 기원 담수의 영향을 받는 수온과 염분의 변동성이 아주 큰 해역이다. 섬이 많고 해안선이 복잡해서 개발과 지구환경 변화에 따른 스트레스를 가장 심하게 받을 것으로 예상되는 각별히 보호가 필요한 생태구이다. 그리고 개발 압력이 높아서 개발과 보존이 서로 상충하는 곳이다.

서남해역 생태구: 지리적으로 여수반도 서안부터 변산반도 남단에 이르는 한반도 돌출부로 조석 혼합이 강한 해역으로 위성사진을 보면 그 경계가 매우 뚜렷하다. 이 생태구역의 가장 중요한 분류자는 탁도이다. 탁도가 높은 연안역은 특성상 표층해수가 저층 해수와 저질의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 수온이 상대적으로 낮고 식물이 필요로 하는 각종 영양염이 풍부하나 탁도에 의해 제약을 받는 곳으로 김과 미역 등 대형 조류의 양식이 아주 활발한 곳이다. 한편 남해 쪽 경계역은 지난 10 년 동안 코클로디니움 적조가 상습적으로 일어났던 해역이며 무산소 환경도 일어나기 쉬운 생태적으로 취약한 해역을 포함하고 있다.

서해중부 생태구: 변산반도 돌출부부터 북쪽 해역은 조차가 세계적으로도 큰 특징을 지니며 비교적 대형 하천인 한강/임진강, 금강, 새만금 방조제, 시화방조제로부터 유입되는 담수의 영향을 크게 받아 염분이 가장 낮은 생태구이다. 이 생태구의 가장 중요한 분류자는 염분과 조차이다. 연안에 갯벌이 넓게 발달해 있고 조석에 의한 씻김이 탁월해서 인구가 밀집되고 강을 통한 산업 폐수가 가장 많이 유입되는 등 오염의 압력이 큰 곳이지만 현재까지 커다란 생태적 문제가 발생하지 않은 천혜의 환경을 지닌 해역이다.

제주 생태구: 제주도는 육지에서 그리 멀리 떨어져 있지 않지만 해류의 흐름이 한반도의 영향을 받지 않게 되어 있어서 다른 생태구가 온대 해역인데 반해 기후체계가 아열대로 다른 특성을 지닌다. 이 생태구역의 가장 중요한 분류자는 기후이다. 현재 진행되고 있는 온난화에 따라 토종 생물이 급격하게 바뀌어 갈 것으로 예상되며 이러한 생물종 변화에 따른 어획 측면에서 부가 이익 발생이 예상되는 해역이기도 하다. 예를 들어 최근에는 참치 어장이 형성되기도 했고 갈치가 풍어를 이루기도 하였다. 이 같은 한시적 어장 형성이 앞으로도 계속될 전망이다(http://www.ytn.co.kr/_ln/0103_201009250000281727).

수질평가 항목의 선정

특정해역의 수질을 평가하기 위해서는 수질특성을 대변하는 평가항목의 설정이 우선적으로 선행되어야 한다. 기존의 연구에 의하면 현재 국내에서 상용되고 있는 평가항목은 이화학적인 수질 항목에 국한되어 있어 생태계를 기반으로 한 수질평가 방법을 위

Table 1. Comparison of coastal environment management by USEPA and Europe Commission (EU).

	USEPA	OSPAR CP	OSPAR EcoQO
Objective	Protection from human induced eutrophication	Protection from human induced eutrophication	Protection from human induced eutrophication
Procedure	Cause/effect Reference value	Cause/effect Reference value	Cause/effect Reference value
Criteria	TN, TP, Chl-a, SAV, Turbidity, DO, Phytoplankton species	TN, TP, DIN, DIP, N/P, Chl-a, nuisance/toxic sp., DO, fish/zoobenthos kill	DIN, DIP, Chl-a, nuisance/toxic sp., DO, fish/zoobenthos kill
Reference value	Reference value for ecoregion (Historical, open coastal water)	Reference value for ecoregion (Historical, model, open coastal water)	Reference value for ecoregion (Historical, model, open coastal water)
Scoring method	Scoring based on % increas from reference value	Salinity normalized reference value: >50%(+), <50%(-)	Salinity normalized reference value: >50%(+), <50%(-)
Grade	Enrichment Index. 5 classes	Integrated assessment 3 classes	Integrated assessment 3 classes

해서는 종합적인 고려가 필요하다(국립수산과학원, 2007). 미국 EPA에서는 수질환경 평가요소를 선정할 때 부영양화를 일으키는 원인항목과 반응효과 등을 기준으로 total phosphorus(TP), total nitrogen(TN), Secchi depth, 클로로필, dissolved oxygen(DO, ml/L), 식물플랑크톤 종조성과 같은 항목들을 사용하고 있다. 그리고 유럽연합 OSPAR의 Common Procedure에서는 역시 원인항목과 반응효과로 나누어서 평가항목(TN, TP, dissolved inorganic nitrogen(DIN, nitrate+nitrite+ammonium), dissolved inorganic phosphorus(DIP), N/P ratio, Chl-a, nuisance/toxic sp., DO, fish/zoobenthos kill등을 사용하였고, OSPAR의 EcoQOs에서는 또한 원인항목과 반응효과로 나누어서 평가항목을 적용하였는데 사용된 평가항목은 DIN, DIP, 클로로필, nuisance/toxic sp., DO, fish/zoobenthos kill등을 사용하였다(Table 1, 국립수산과학원 2007).

현재 국가 해양환경 측정망에서 정기적으로 관측하고 있는 항목으로 pH, chemical oxygen demand(COD), DO, DIN, DIP, TN, TP, Silicate, suspended particulate material(SPM), Secchi depth, 클로로필 등이 있다. 기존의 해양환경기준에서는 이들 항목들 중에서 COD, DO, TN, TP등에 대해서 기준을 마련하고 있다. 그러나 이들 항목들은 앞서 미국이나 유럽의 경우와 같이 원인항목과 반응효과 항목으로 나누어져 있지 않다. 이들 항목 중에서 부영양화를 일으키는 원인항목에 해당하는 것들은 COD, DIN, DIP, Silicate, TN, TP등이 있다. 그리고 반응항목에 해당하는 것으로는 pH, DO, SPM, Secchi depth, 클로로필 등을 들 수 있다. 원인항목들 중 외국의 원인항목들과 일치하는 것들은 DIN, DIP, TN, TP등이다. 그리고 반응효과 항목들 중 외국의 것들과 일치하는 것들은 DO, Secchi depth, 클로로필 등이다.

부영양화를 일으키는 물질은 여러 가지 경로를 통해서 해양환경에 유입된다. 유입된 부영양화 물질들은 식물플랑크톤에 의해 이용되어서 입자상태로 전환되거나 해수 중에 용존상태로 존재한다(Fig. 2). 따라서 입자상태로 전환된 물질들은 클로로필로 측정할 수 있고, 용존상태로 존재하는 부영양화 원인 물질들은 해수중의 DIN과 DIP로 측정할 수 있다. DO는 부영양화에 의해 증가된 식물플랑크톤이 죽어 분해될 때 소비되기 때문에 부영양화의 이차반응 항목으로 적절하다. DO의 용해도는 수온과 염분의 영향을 받기 때문에 단순한 농도보다는 해수의 포화농도에 대한 상대적인 비율인 포화도를 사용하는 것이 생물이 수중에서 감지할 수 있는 실질적인 영향을 잘 반영할 것으로 판단되어 포화도를 사용하

Fig. 2. Partition of nutrient within the water column, loaded in the coastal region.

였다.

따라서 본 연구에서는 부영양화 평가항목 중 원인항목으로는 해수 중에 용존 되어있는 질소와 인을 나타내는 DIN, DIP를 사용하였다. 반응항목은 일차반응 항목과 이차반응항목으로 나누었다. 일차반응항목에는 투명도를 나타내는 Secchi depth와 식물플랑크톤 생체량의 지시자인 클로로필을 사용하였다. 그리고 이차반응 항목으로 저층 DO 포화도(%sat)를 사용하여 앞서 설명된 5개의 생태구의 부영양화 상태를 평가 하였다(Table 2).

Table 2. Parameters for the water quality assessment in the coastal areas.

Categories	Parameters for the water quality assessments
Cause	Surface DIN (ug/L)
	Surface DIP (ug/L)
Primary response	Secchi depth (m)
	Surface Chlorophyll-a (ug/L)
Secondary response	Bottom Dissolved Oxygen saturation(%)

해역별 수질평가 기준값설정

연안환경은 하구역, 만, 대륙붕 등의 복잡하고 다양한 특성을 가지고 있어 부영양화에 대한 반응도 환경특성마다 다르게 일어난다. 그래서 같은 양의 부영양화 물질 유입이 일어나더라도 해양환경의 특성에 따라서 다른 반응이 나타나므로 환경의 특성을 고려한 다른 수질평가 기준을 설정하는 것이 바람직하다. 그러나 기존의 수질평가 기준은 다양하고 복잡한 환경 특성을 고려하지 않고 전국 연안에 일률적으로 같은 기준을 적용하여 해역을 평가하였다. 국외에서는 이미 해역 환경특성을 고려한 수질환경 기준값 사용을 권장하고 있다. 따라서 국내도 이러한 국제적인 추세에 따라 해양환경의 특성에 따른 기준값을 설정해야 한다는 공감대가 형성되어 가고 있다. 따라서 해양환경특성(수심, 해류의 영향, 조위차, 탁도, 기후)에 의해 구분된 다섯 가지 생태구역(동해 생태구, 대한해협 생태구, 서남해역 생태구, 서해중부 생태구, 제주 생태구)에 대해 각각의 해양환경 특성에 맞는 수질기준을 설정하고자 한다.

미국의 EPA, 유럽연합의 OSPAR CP, OSPAR EcoQO 등은 해역평가를 위한 해역유형별 기준값 설정에 대한 지침서에 인간의 영향을 받기 이전인 원시상태를 기준값으로 할 것을 권장하고 있다. 그러나 대부분의 해역이 인간 활동에 의한 영향으로 원시상태가 존재하지 않는다. 차선택으로 역사적인 기록이나 외해의 값을 기준값으로 사용하기도 한다(Table 1). 우리나라 주변해역도 대부분 인간활동에 의한 영향으로 원시상태가 존재하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 연안역에서 이용 가능한 역사적인 기록이나 외해의 자료를 기준값으로 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 현재 연안역에서 이용 가능한 가장 적절한 자료는 전국 연안역을 해역별로 1992년부터 2월, 5월, 8월, 11월에 관측하고 있는 국가해양환경 측정망 자료이다.

본 연구에서는 2000년부터 2007년까지의 자료 중에서 연안역에서 가까우면서도 육상으로부터 담수유입의 영향이 최소인 측정망의 외양역 정점으로부터 기준값을 설정하였다. 연안환경의 수질에 영향을 주는 요소는 육상으로부터 유입되는 인위적인 요소와 외양역으로부터 유입에 의한 변동을 들 수 있다(Fig. 3). 인간의 다양한 경제적 활동으로 육상으로부터 유입되는 각종 부영양화 물질이 연안환경에 끼치는 영향에 중점을 두어 외양역에서 유입되는 자연적인 변동은 고려대상에서 제외하였다. 육상에서 유입되는

Fig. 3. Schematic diagram of nutrient pathway into the coastal regions. Nutrients in coastal region were introduced by the river runoff and horizontal transport from offshore region.

부영양화물질은 대기, 지하수, 하천 등을 통하여 연안환경에 유입된다. 본 연구에서는 하천을 통한 유입을 우선적으로 고려하고 나머지 대기나 지하수를 통한 유입은 고려되지 않았다. 최근 몇몇의 연구에 의하면 연안의 해저면을 통해 유입되는 지하수가 연안생태계에 중요한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있기 때문에 추후 이를 고려 해야 할 것으로 시료된다(Lee, et al. 2010).

하천을 통해 연안환경으로 유입되는 부영양화 물질의 공간적인 영향 범위를 파악하기 위해서 하천 유입이 가장 적을 것으로 판단되는 2월과 하천유입의 영향이 가장 클 것으로 예상되는 8월의 표층 염분의 차이값을 사용하였다(Fig. 4). 국가해양측정망 자료를 각 정점에서 2월과 8월의 8년간 월별평균 값을 보면 2월 평균염분 값에 비해서 8월의 평균염분 값의 변동이 크게 나타났다. 특히 하천수의 유입이 있는 정점들에서는 8월 평균 염분의 감소가 크게 나타났다(Fig. 4). 각 생태구별 하천수 유입의 공간 영향범위를 파악하기 위해서 각 정점의 2월과 8월의 8년간 평균염분 차이를 구했다(2월의 8년간 평균염분-8월의 8년간 평균염분). 2월과 8월의 염분차이 값이 클수록 하천의 유입 영향이 큰 것으로 가정하였다.

동해 생태구는 대부분의 정점에서 염분차이 값이 2내외의 값을 보였으나 형산강과 영일만에 위치한 정점에서는 약 3정도의 차이를 보였다. 대한해협 생태구는 외해와 인접한 정점들에서는 염분차이가 2이내의 값이 나타났지만 하천의 영향을 많이 받는 해역에서는 3에서 14까지의 큰 차이를 보였다. 서남해역 생태구 대부분의 정점에서 2월과 8월의 염분차이가 2이내의 값을 보였으나 일부 담수의 유입이 있는 곳에서 3이상의 차이가 나타났다. 서해중부 생태구역에서는 군산연안, 천수만, 인천연안, 시화호등의 담수의 유입이 있는 곳에서 염분차이가 크게 나타났고 다른 정점들에서는 염분차이가 작았다. 제주 생태구는 모든 정점의 염분차이가 3정도로 일정하였다. 다른 생태구역들에서 외양역과 인접한 정점들에서 염분차이가 2 이내로 작은 값을 보인 것에 비하면 하천

Fig. 4. Mean salinity of February and August during 8 year (2000-2007) and difference of mean salinity between February and August at the National Marine Environment Monitoring Stations (NMEMS). Arabic numbers in the figures indicate ecoregions: (1) East Sea Ecoregion, (2) Korea Strait Ecoregion, (3) western South Sea Ecoregion, (4) central West Sea, (5) Jeju Ecoregion.

의 영향을 받지 않는 제주지역에서 상대적으로 큰 염분의 차이를 보인 것은 제주 생태구역에는 하계 양자강에서 나온 담수의 영향인 것으로 사료된다(이, 1999). 따라서 8월과 2월의 평균염분 값의 차이가 하천수 유입영향의 공간범위를 진단하는데 유용한 지표로 사용될 수 있음을 시사한다.

그러나 연안역에서 염분의 변화는 하천수 유입뿐만 아니라 외양에서 유입되는 해수의 계절적인 변동에 의해서도 일어날 수 있다(Fig. 3). 따라서 연안역에서 하천의 영향이 없어도 외양에서 일어나는 자연적인 변동이 연안의 염분에 영향을 끼친다. 그러므로 각 생태구에서 하천수 유입에 의해서만 일어나는 수질 변동을 평가하기 위해서는 각 생태구에서 외양수 유입에 의한 해수의 자연적인 수질변동을 제외시켜야 한다. 하천수의 유입이 없고 외양수의 유입에 의한 수질 변동을 고려한 기준값을 설정하기 위해서 각각의 생태구역에서 외양수의 특징을 가진 해수의 수괴를 정의하여야 한다.

본 연구에서는 각각의 생태구에서 국가해양환경측정망 정점에서 2000년부터 2007년까지의 8년간의 월별 평균값 중 2월과 8월의 염분차이를 구하였다. 그리고 각 생태구에 해당하는 정선관측의 연안에 가장 가까운 내측 2개 정점 2000년부터 2007년까지의 8년간의 월별 평균값 중 2월과 8월의 염분차이와 국가해양환경 측정망에서 구한 2월과 8월의 염분차이와 비교하였다. 그래서 국가해양환경측정망의 정점들 중 2월과 8월의 염분 차이가 정선관측의 정점의 2월과 8월의 염분차이보다 작은 정점들을 선정하여 외양수의 특징을 가지는 것으로 정의하고 이들 정점들의 월별평균값과 표준편차를 이용하여 기준값을 정하는데 사용하였다. 외양역의 특성을 가진 해수의 평균염분차이는 동해, 대한해협, 서남해역, 서해중부, 제주 생태구들에서 각각, 1.48, 2.08, 1.67, 0.82, 3.48 이었다.

클로로필, 표층 DIN, 표층 DIP의 기준값은 각 생태구의 외양역의 8년간 계절별 평균값 중 최대값에 표준편차를 더한 값으로 정하였다(Table 3). 이들의 최대값을 기준값으로 정한 것은 겨울철 생물의 활동이 최소이고 물리적인 혼합에 의해 외양의 영향이 연안에 최대일 때 생태계가 가질 수 있는 영양염의 최대 농도라고 가정하였다. 그리고 외양역에서 자연적으로 발생할 수 있는 식물 플랑크톤의 변동을 고려하기 위해서 외양역의 클로로필 최대값을 기준값으로 설정하였다. 외양역의 정점간의 변동에 의한 영향을 배제하기 위해서 평균값에 표준편차를 더하여서 기준값을 설정하였다. Secchi depth의 경우에는 물리적인 혼합에 의해서 저층의 퇴적물이 부유되어 발생하는 자연적인 변동과 각 생태구의 정점간의 변동을 고려하기 위해서 외양역의 계절별 평균값의 최소값에서 표준편차를 뺀 값을 기준으로 하였다. 저층용존산소는 포화도 값이 각 생태구의 외양역 정점에서 저층용존산소의 계절별 평균이 최소로 나타난 값인 90%를 전해역의 기준 값으로 선정하였다

(Table 3).

평가항목별 평가점수 계산방법

생태구별로 다르게 설정된 기준 값으로부터 각 생태구의 모든 정점에 대해서 각각평가항목별로 평가하는 방법은 미국의 EPA의 방법과 유럽연합의 CP와 EcoQO는 다르게 적용하고 있다(Table 1). 미국의 EPA의 경우에는 기준값에 %증가에 따라 5개의 등급으로 점수화를 시도하였고, 유럽연합의 경우는 항목별로 염분보정 기준값의 50%이상을 초과하느냐 초과하지 않느냐에 따라 양분하는 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 평가항목별로 다양한 점수를 부여할 수 있는 미국의 EPA방법을 적용하였다. 클로로필, DIN, DIP에 대해서는 해역별 기준값보다 이하이면 1점, 110% 미만이면 2점, 125% 미만이면 3점, 150% 미만이면 4점, 그리고 150% 이상이면 5점을 부여하였다(Table 4). 저층용존산소 포화도(%sat)와 Secchi depth의 경우에는 기준값 이상이면 가장 낮은 점수인 1을 부여하고 기준 값에서 기준 값의 10, 25, 50%를 뺀 값을 초과할 경우에 각각 2, 3, 4점을 부여하였고 50%를 뺀 값 이하일 경우 가장 높은 점수인 5점을 부여하였다.

각 생태구 개별 평가항목의 농도가 다양한 정점들(Table 5)에 대해 위의 평가방법을 적용했을 때 개별정점의 항목별 점수를 오각형 그림으로 표시하였다(Fig. 5). 동해 생태구 정점인 영일만4 정점과 대한해협 생태구의 부산연안3 정점에서 개별 항목의 농도는 유사하였지만 평가점수는 상이하게 나타났다. 원인항목인 DIN의 농도는 영일만4 정점이 부산연안3 정점보다 낮으나 동해 생태구의 기준값이 대한해협 생태구 보다 낮기 때문에 더 높은 점수인 4점을 받고 부산연안3 정점은 DIN농도 값은 영일만4 정점보다 높았으나 평가점수는 1점이었다. 두 정점에서 Secchi depth의 차이는 작으나 기준값의 차이가 크기 때문에 평가점수의 차이가 크게 났다. 서해중부 해역에 있는 인천2 정점의 DIN의 농도는 다른 해역의 정점들에 비해 2배이상 높지만 점수는 1점으로 영일만4 정점이나 가막만1 정점보다 낮게 나타났다. 특히 서해중부 생태구의 인천연안2 정점은 다른 정점들과 관측값은 비슷하지만 모든 평가항목들의 점수는 1점으로 나타났다. 기존의 수질평가 방법에서는 생태구의 특징과 상관없이 절대농도가 같으면 같은 등급의

Table 4. Scoring method of each parameter.

Score	Chl-a, DIN, DIP	DO, Secchi Depth
1	≤ Reference value (=100%)	≥ Reference value (=100%)
2	< 110%	> 90%
3	< 125%	> 75%
4	< 150%	> 50%
5	≥ 150%	≤ 50%

Table 3. Reference values of dissolved oxygen (% sat), chlorophyll-a, secchi depth, surface DIN, surface DIP at each ecoregion.

Ecoregions	Bottom DO (% sat)	Surface Chl-a (mg/L)	Secchi depth (m)	Surface DIN (ug/L)	Surface DIP (ug/L)
East Sea (1)	90	2.1	8.5	140	20
Korea Strait (2)	90	6.3	2.5	220	35
Western South (3)	90	3.7	0.5	230	25
Central West (4)	90	2.2	1.0	425	30
JeJu (5)	90	1.6	8.0	165	15

Table 5. Parameter values of parameters at stations selected from each ecoregion (East Sea, Korea Strait, western South Sea, and central West Sea.

Ecoregions	region	Bottom DO	Chl-a	Secchi Depth	DIN	DIP
		mg/L	ug/L	m	ug/L	ug/L
East Sea (1)	Yongil bay	6.92	23.0	1.8	179	10
Korea Strait (2)	Busan	7.22	17.3	2.5	200	2
Western South (3)	Gamak bay	4.94	15.5	2.4	235	6
Central West (4)	Incheon	6.92	1.0	1.1	402	26
	Sihwa lake	1.90	52.0	1.3	8	16

Fig. 5. Pentagonal diagram showing the score of each parameter at stations shown at Table 5. Color in the diagram indicate the visualization of status of each parameters: Inner dark indicates good status (score 1 and 2 of each parameter), Middle light indicates cautious status (score 3 and 4 of each parameter), Outer dark indicates warning status that needs to set up special monitoring plan (score 5 of each parameter).

로 판정받았지만, 본 연구에서는 각 생태구별로 기준값이 다르기 때문에 절대농도가 같아도 생태구에 따라 점수가 다르게 나타났다(Fig. 5). 또한 오각형 그림으로 각 평가항목에 대한 현재의 상태를 효과적으로 표현할 수 있다.

수질지수 계산

현행 수질기준은 같은 정점에서도 개별평가항목에 따라 다른 등급이 나와서 해역의 실질적인 수질등급을 평가하기가 어렵다. 따라서 종종 COD를 기준으로 수질등급을 결정하였다. 본 연구에서 계산된 개별평가 항목의 점수는 현재 해역의 문제점을 효과적으로 나타내는 장점은 있으나 평가항목별 점수가 다르게 나오기 때문에 같은 생태구역내의 다른 정점 또는 다른 생태구에 있는 정점들과의 상대적인 비교를 통한 효과적인 국가해양관리 정책을 수립하기에는 미흡한 점이 있다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위해서 개별평가 항목의 점수를 통합하여 모든 정점에 공통으로 적용되는 지수가 필요하다.

미국의 EPA의 경우에는 개별 평가항목에서 획득한 점수를 산술적으로 더해서 Enrichment Index Value 구하고 이 값으로 다른 정점과 비교하여 상대적인 부영양화 정도를 평가 하였다(EPA 2001). 그러나 단순히 산술적으로 합하는 것은 항목별의 중요도가 고려되지 않아 적절한 부영양화 상태를 결정하는데 어려움이 있

다. 이런 단점을 보완하기 위한 노력이 있었지만 평가항목의 상대적인 중요도를 고려하지는 않았다.

부영양화 원인물질이 연안환경으로 유입될 때 가장 먼저 일어나는 반응은 일차반응항목인 식물플랑크톤의 대량번식으로 인한 유해성 적조발생과 이에 따르는 결과로 생성되는 이차반응항목인 저층용존산소의 결핍이다. 따라서 적조발생과 밀접한 관련이 있는 클로로필과 저층용존산소 결핍으로 인한 수중생물의 질식사자 중요한 문제이기 때문에 두 가지 항목에 대한 가중치를 부여하였다. 그리고 부영양화 원인물질인 DIN과 DIP의 농도가 비록 높더라도 적조발생을 지시하는 엽록소의 농도가 낮거나 저층용존산소 포화도가 높으면 나쁜 환경이 아닌 것으로 판단 될 수 있다. 그리고 DIN과 DIP의 농도가 낮더라도 엽록소의 농도가 높거나 산소포화도가 낮으면 나쁜 상태로 분류된다.

따라서 원인물질(DIN, DIP), 일차반응항목(클로로필, secchi depth), 그리고 이차반응항목(저층용존산소 포화도) 순으로 가중치를 부여하는 가중선형합산법(weighted linear combination method)으로 수질지수를 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{수질지수} = & 10 * \text{이차반응 항목 점수(저층용존산소 포화도)} \\ & + 6 * \text{일차반응 항목(클로로필, secchi) 평균점수} \\ & + 4 * \text{원인항목(DIN, DIP) 평균점수} \end{aligned}$$

위의 계산에서 나올 수 있는 최소값은 20이고 최대값은 100이다. 값이 낮으면 좋은 상태를 의미하고 반면 높은 값은 나쁜 상태를 나타낸다.

수질지수의 등급화

생태구역의 개별 정점에서 구한 통합된 점수는 다른 생태구역의 정점들과 상호 비교가 가능하다. 그러나 높은 값으로 인해서 관리적인 측면에서 비효율적인 요소가 있다. 유럽연합의 경우는 부영양화상태를 평가하기 위해서 1997년부터 유럽연합 가입국에 의해서 공통적으로 OSPAR Common Procedure(OSPAR CP)를 적용해오고 있다. OSPAR CP는 두단계로 적용된다. 첫 단계는 선별과정(screening procedure)으로 “broad brush”로 확실한 청정해역(non-problem area)을 지정한다. 두 번째 단계는 포괄적인 과정(comprehensive procedure)으로 선별과정에서 청정해역으로 명시되지 못한 해역을 대상으로 부영양화과정의 주요 원인과 결과를 반영하는 항목들에 대해 정성적인 기준을 확립하여 해역의 부영양화 상태등급을 결정하는 방법을 사용하고 있다.

미국의 하구역 부영양화 평가에서는 수질 평가항목 중 일차증상과 이차증상에 해당하는 항목을 낮음, 보통, 높음으로 구분하고 이들의 조합을 이용해서 통합수질을 다섯 가지 단계로 구분하는 방법을 사용하고 있다(EPA, 2004). 우리나라에서는 담수역을 하천과 호소로 구분하여 생활환경항목을 7개 등급으로 구분하여 용존산소량과 오염물질의 양을 기준으로 각 등급의 물 상태를 설명하고 있다(Table 6). 본 연구에서도 관리 목표설정을 용이하게 하고 국제적인 경향과 국내 다른 기관의 경향을 반영하여 수질지수를 5단계(아주좋음, 좋음, 보통, 나쁨, 아주나쁨)로 나누었다.

수질지수값을 5단계로 나누는 방법은 다음과 같다. 우선 2000년부터 2007년까지의 모든 자료에 대해서 생태구별 기준값을 적

용하여 평가점수를 계산한 후 위의 식에 개별평가 항목의 점수를 대입하여 수질지수를 계산하였다(Fig. 6). 2000년부터 2007년까지 총 8,340개의 자료에서 수질지수의 최소값은 20으로 모든 평가항목이 1점에 해당하는 경우이다. 그리고 수질지수의 최대값은 100으로 모든 평가항목이 5점인 경우이다. 평균은 33이고 표준편차는 13이었다. 8,340개 자료의 도수분포 특징은 쌍봉분포(bimodal distribution)로 최소값이 20점이 가장 높은 빈도수를 보였고 22에서 급격히 감소한 후 다시 빈도수가 증가하여 중앙값인 30에서 두 번째 봉우리가 나타난 후 감소하는 경향을 보였다. 따라서 가장 빈도수가 높은 20에서 급격히 감소하다 증가하는 22와 24사이의 값인 23 이하일 경우 아주좋음(I등급)을 부여하고 수질지수가 23 초과 최소값+표준편차(33) 이하일 경우 좋음(II등급), 최소값+2표

Fig. 6. Frequency distribution of water quality index calculated from all measurements of national marine environment monitoring stations from 2000 to 2007.

Table 6. Water quality reference values and grade system for freshwater(환경부, <http://water.nier.go.kr/front/waterEasy/policy01.jsp>).

Grade	Status		Reference							
			pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	Suspended mateiral (mg/L)	DO (mg/L)	TN (mg/L)	Coliforms (individual/100 mL)	
									Total Coliforms	Fecal Coliforms
Very Good	Ia		6.5~8.5	≤1	≤2	≤25	≥7.5	≤0.02	≤50	≤10
Good	Ib		6.5~8.5	≤2	≤4	≤25	≥5.0	≤0.04	≤500	≤100
SightlyGood	II		6.5~8.5	≤3	≤5	≤25	≥5.0	≤0.1	≤1,000	≤200
Moderate	III		6.5~8.5	≤5	≤7	≤25	≥5.0	≤0.2	≤5,000	≤1,000
Slightly Bad	IV		6.0~8.5	≤8	≤9	≤100	≥2.0	≤0.3	-	
Bad	V		6.0~8.5	≤10	≤11	no litter	≥2.0	≤0.5	-	
Very Bad	VI		-	>10	>11	-	<2.0	>0.5	-	

Table 7. Water quality grade and cumulative frequency correspond to water quality index criteria determined from frequency distribution of Fig. 6.

Grade	Index	Cumulative Frequency
Very Good(I)	$I \leq 23$	< 30
Good(II)	$23 < I \leq 33$	31-61
Moderate(III)	$33 < I \leq 46$	61-87
Bad(IV)	$46 < I \leq 59$	87-95
Very bad(V)	$I \geq 60$	> 95

준편차(46) 이하일 경우 보통(III등급), 최소값+3표준편차(59) 이하일 경우 나쁨(IV등급), 그리고 최소값+3표준편차 (60) 이상일 경우는 아주나쁨(V등급)으로 하였다(Table 7).

2009년도 국가해양측망에서 관측된 모든 자료에 대해서 평가한 결과에서 2월의 경우는 전체 정점 중 I등급에 해당하는 정점이 122개로 가장 많고 II등급이 104개 정점, III등급이 50개 정점, IV등급이 3개 정점, V등급은 나타나지 않았다. 5월의 경우는 I등급 정점이 2월보다 늘어났고 II등급과 V등급은 2월보다 감소하였고, V등급의 정점이 5개로 늘어났다. 8월의 경우 I등급 정점이 5월보다 약 50개 정점이 감소된 반면 III등급, IV등급, V등급 정점의 수가 5월보다 늘었고 II등급은 5월과 비슷하였다. 그리고 11월은 2월과 비슷한 경향을 나타냈다(Fig. 7).

새로운 평가체제와 기존의 평가체제를 비교하기 위해서 새로운 평가체제에서 나온 등급을 기존의 3단계로 조정하여 비교하였다. 새로운 등급에서 매우 좋은 상태를 나타내는(I 등급)은 기존의 I 등급에 상응하고, 새로운 등급의 좋은 상태(II 등급)와 보통 상태

Table 8. Comparison of water quality evaluation results between new method and current COD method (February and August 2009).

New Grading			Grade based on COD		
Grade	Station#		Grade	Station#	
	February	August		February	August
Very Good (I)	122	81	I	188	84
Good (II)	104	90	II	74	128
Moderate (III)	50	64	III	17	64
Bad (IV)	3	22			
Very Bad (V)	-	22			

(III 등급)를 합쳐서 기존의 II등급에 대응되며, 새로운 등급의 나쁜 상태(IV 등급)와 아주 나쁜 상태(V 등급)은 기존의 III등급과 같은 상태로 하여 2009년도 2월과 8월의 수질등급을 새롭게 제시되는 평가방법과 기존의 COD로 전국 연안을 평가한 결과를 비교하면 다음과 같다(Table 8).

새로운 방법은 단지 수질등급만을 제시하는 것이 아니고 어떤 평가항목이 수질등급에 영향을 끼치는가를 오각형 그림을 이용하여 분석하는 방법도 제공한다. 전국연안에서 2009년 2월의 평가 결과를 보면 동해 생태구의 강릉1과 서해중부 생태구의 군산1과 인천15등과 같은 몇몇 정점을 제외하면 대체적으로 I에서 II등급이 나타났으며 대한해협 생태구의 마산1 정점의 경우는 겨울철에는 클로로필과 Secchi depth의 점수가 높아 III등급으로 나타났으나 용존산소는 1점으로 좋은 상태임을 알 수 있다. 그리고 강릉1, 군산1, 인천15는 2월에 같은 등급을 판정받았지만 각각 다른 요소

Fig. 7. Seasonal frequency distribution of water quality grades from each ecoregion determined by this study applied to 2009 national marine environment monitoring data.

Fig. 8. Map of water quality grade of February 2009 and pentagonal diagram of selected stations.

에 의해서 높은 등급이 나타났음을 알 수 있다(Fig. 8).

2009년 8월의 경우는 동해 생태구의 동해연안부터 영일만의 몇몇 정점에서 III등급에서 V등급이 나타났다(Fig. 9). 이는 축산1 정점에서 보이듯이 저층용존산소 포화도와 Secchi depth의 점수가 높거나 다른 정점들에서는 용존산소의 포화도는 좋으나 클로로필과 Secchi depth의 점수가 높았기 때문이다. 이는 하계 저층냉수의 용승에 의한 식물플랑크톤의 대량번식과 관련이 있는 것으로 추정된다. 저층수온도 클로로필의 농도가 높은 곳에서는 다른 곳보다 낮게 나타났다. 따라서 비록 육상으로부터 유입되는 영양염의 증가에 의한 부영양화가 아니더라도 저층에서 공급되는 자연적인 변동이라 하더라도 저층냉수괴의 발달은 동해안 연안의 양식에 영향을 주는 요인으로 작용하기 때문에 이에 대한 영향도 지속적으로 모니터링 해야 할 것으로 판단된다.

대한해협 생태구의 마산1 정점과 마산2 정점은 거리상으로는 약 3 km정도 차이가 있으나 등급이 다르게 나타났다(Fig. 9). 마산1 정점은 클로로필과 Secchi depth의 점수가 높은 반면 저층용존산소 포화도는 1점으로 III을 유지하고 있지만 마산2 정점은 저층용존산소 포화도와 클로로필의 점수가 높아서 V등급으로 나타났다. 두 정점 모두 원인항목인 DIN과 DIP의 점수는 1점으로 좋은 상태를 보였다. 따라서 이 두 지점은 식물플랑크톤이 표층의 영양염을 소모하면서 급격하게 증가하여 표층의 클로로필이 높고 Secchi depth가 낮게 된 것으로 사료된다. 그리고 마산2 정점은 마산1 정점과 달리 저층에서 유기물 분해가 많이 일어나 이미 빈산소 수괴가 형성되어 있는 것으로 판단된다.

서해중부 생태구에 위치한 군산1 정점과 시화호1 정점들은 V등급이 나타났으나 V등급이 나타난 원인은 상이하다. 군산1 정점

은 클로로필, Secchi depth, DIN, DIP 등이 4-5점의 높은 점수인 반면 저층용존산소 포화도는 낮게 나타났다. 그러나 시화호1 정점의 경우는 DIN과 DIP는 각각 1점으로 좋은 상태를 보였으나 저층용존산소 포화도와 클로로필, Secchi depth등이 4-5점의 높은 점수가 나타나 V등급이 나타났다. 제주 생태구의 서귀포3 정점은 DIN과 DIP는 1점으로 양호하나 클로로필이 5점이고 저층용존산소포화도와 Secchi depth등이 경계지역에 위치해서 IV등급으로 판정을 받았다.

앞서 설명한 예들에서 보였듯이 본 연구의 결과는 수질의 등급을 결정할 때 다섯 가지 평가항목의 결과를 사용하기 때문에 해당 지역의 특성을 반영하여 수질등급이 결정되고 오각형 그림을 통해서 수질등급을 결정하는 주요변수를 잘 보여줄 수 있는 장점이 있다.

평가시기

미국 연안관리 지침서에는 부영양화를 평가하는 시기를 부영양화 정도가 중간 이하인 지역에서는 부영양화 증상이 가장 심할 것으로 예상되는 7월 또는 8월의 가장 나쁜 것으로 예상되는 시기에 대해서 1년에 한 번 평가를 하는 것이 충분한 것으로 제시하고 있다(EPA, 2001). 그러나 부영양화 상태 또는 과 부영양화 상태인 상황에서는 최소한 년 간 2회 이상 평가를 수행할 것을 권장하고 있다(NRC, 2000). 본 연구에서는 수질등급을 평가하기에 적절한 시기를 선정하기 위해서 각각의 생태구역에서 하천수 유입 영향 정도에 따른 국가해양측정망의 8 년간의 2월, 5월, 8월, 11월의 개별 수질평가 항목의 변화를 분석하였다. 대표적으로 대한해협 생태구역의 결과를 살펴보면 다음과 같다(Fig. 10-14).

여기에 표시는 되지 않았지만 하천수 유입이 DIN에 미치는 영

Fig. 9. Map of water quality grade of August 2009 and pentagonal diagram of selected stations.

Fig. 10. Relationship between surface DIN and 8 year mean salinity difference between February and August at Korea Strait ecoregion.

향은 저층에서는 크지 않았으며 표층에서 크게 나타났다. 표층 DIN은 일반적으로 염분차이가 커질수록 증가하는 경향이 나타났

고, 특히 다른 계절보다는 하계인 8월에 더욱 뚜렷한 경향이 나타났다(Fig. 10). 표층 DIP는 2월에 염분차이가 커질수록 감소하는

Fig. 11. Relationship between surface DIP and 8 year mean salinity difference between February and August at Korea Strait ecoregion.

Fig. 12. Relationship between Secchi depth and 8 year mean salinity difference between February and August at Korea Strait ecoregion.

경향을 나타냈으며 다른 달에도 염분차이에 따른 증가의 경향이 용존 질소보다 적게 나타났다(Fig. 11). Secchi depth는 일반적으로 염분차이가 커질수록 감소하는 경향이 나타났으며 감소정도는 8월 달이 다른 달에 비해 크게 나타났다(Fig. 12). 클로로필은 Secchi depth와 달리 염분차이가 커질수록 증가하는 경향이 나타났으며 역시 8월에 기울기가 더욱 큰 값을 가졌다(Fig. 13). 용존 산소는 표층에서 하천수의 유입정도와 월별 평균값과의 차이가 거의 없고 저층에서 2월, 5월, 11월은 염분차이에 따른 감소하는 경

향이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그러나 8월은 염분차이가 커질수록 용존산소 포화도의 감소 경향이 뚜렷하게 나타났으며 일부정점들에서는 아주 낮은 포화도 값이 관측되었다(Fig. 14). 제주생태구를 제외한 나머지 생태구역에서 8월 하천수 유입 영향이 큰 시기에 수질평가 항목들의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 따라서 8월이 하천수 유입에 의한 수질등급을 정도를 평가하는데 적절한 시기라 사료된다.

Fig. 13. Relationship between surface chlorophyll-a and 8 year mean salinity difference between February and August at Korea Strait ecoregion.

Fig. 14. Relationship between bottom DO saturation and 8 year mean salinity difference between February and August at Korea Strait ecoregion.

결론

새롭게 제시된 수질평가방법은 전국연안을 해양환경의 특성에 따라서 해역을 다섯 개의 생태구역으로 나누고 수질평가항목을 부영양화 원인물질(표층 DIN, 표층 DIP), 일차반응항목(클로로필, Secchi depth), 그리고 이차반응항목(저층 용존산소포화도)등으로 선정하였다. 그리고 해역별 환경특성을 고려하여 기준값을 설정하여 기준값으로부터 벗어난 정도에 따라 점수를 부여하였고 평가

항목의 개별 점수를 이용하여 이차반응항목, 일차반응항목, 원인물질순으로 가중치를 다르게 부여하는 가중선형합산법으로 수질지수를 계산하였다. 2000년부터 2007년까지 관측된 8,340개의 자료를 평가한 수질지수 결과의 빈도분포, 최소값(20), 표준편차(13) 등을 이용하여 수질등급을 5단계로 등급(아주좋음(I), 좋음(II), 보통(III), 나쁨(IV), 아주나쁨(V))으로 구분하였다.

기존에 사용하고 있는 I, II, III등급 체계와 새로운 평가방법에서 나온 결과를 비교하기 위해서 새로운 방법의 5등급 체계의 아

주중음(I)은 기존의 I등급과 상응하게 하고 좋음(II)과 보통(III)은 II등급으로, 그리고 나쁨(IV)과 아주나쁨(V)을 나뉘은 III등급에 대응하게 하여 현재 사용하고 있는 COD에 의한 III등급 체계에서 나온 결과와 비교가 가능하다. 그러나 수질등급을 평가하기 위한 수질기준을 생태구역의 해양환경특성을 나타내는 기준값을 선정하여 평가를 진행하였기 때문에 기존의 해역의 특성을 고려하지 않고 동일한 기준값을 적용하여 평가하는 방식보다는 연안환경의 특성을 잘 반영하는 것으로 사료된다. 그러나 가장 많은 가중치가 부여된 저층용존산소 포화도의 경우에는 다섯 개 생태구역에 공통적인 기준값이 적용되어 인접한 해역이 다른 생태구역에 위치해 있기 때문에 상이한 기준값 적용에 의한 수질지수의 급격한 변동이 없을 것으로 예상된다. 비록 제한된 수질등급 평가방법이 기존의 특정항목에 의해 결정된 수질등급보다는 연안의 환경특성을 잘 반영하고 있지만 여전히 개선의 여지가 있을 것이다. 이러한 사항은 추후 지속적인 연구를 통해서 보완 되어야 할 것으로 사료된다.

사 사

자료를 제공해주신 국립수산물과학원 및 해양환경관리공단 관계자 여러분께 감사드립니다. 많은 조언을 해주신 심사위원 여러분께 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부의 해양환경기준 설정과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 국립수산물과학원 2007. 해양환경기준 설정을 위한 선행연구, 국립수산물과학원, 283pp.
- 이동섭, 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포특성. *The Sea*, 4(4): 371-382.
- 임동일, 최현우, 김영옥, 정희수, 강영실, 2011. 한국 연안역 수질 성분들(COD, DIN, DIP, Chlorophyll-a)의 해역별 농도 특성과 등급화: 통계적 접근. *Ocean and Polar Research*, 33(1):

13-20.

- 한국해양연구원, 2007. 연안 해역건강도 평가기술 개발을 위한 예비연구, BSPE 97904-1909-3.
- Madden, C.J., D.H. Grossman, and K.L. Goodin, 2005. Coastal and Marine Systems of North America: Framework for an Ecological Classification Standard: Version II. NatureServe, Arlington, Virginia.
- AWQG (Australian Water Quality Guideline) 2000. Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters. Australian and New Zealand environment and Conservation Council, Canberra, 250pp.
- EHMP (Ecosystem Health Monitoring Program) 2008. Ecosystem Health Monitoring Program 2006-2007 Annual Technical Report. South East Queensland Healthy Waterways Partnership, Brisbane, 162pp.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2001. Nutrient criteria technical guidance manual: Estuarine and coastal marine waters, EPA-822-B-01-003.
- EPA (Environmental Protection Agency), 2004. National coastal condition report II.U.S. Environmental Protection Agency, EPA-620/R-03/002.
- Lee, Y.-W., G. Kim, W.-A. Lim, and D.-W. Hwang 2010. A relationship between submarine groundwater-borne nutrients traced by Ra isotopes and the intensity of dinoflagellate red-tides occurring in the southern sea of Korea. *Limnol. Oceanogr.* 55: 1-10.
- NRC (National Research Council), 2000. Coastal waters: Understanding and reducing the effects of nutrient pollution, National academy press, Washington, D.C., 405pp.
- Yoo, S., J. Park, 2009. Why is the southwest the most productive region of the East Sea/Sea of Japan? *J. Mar. Res.*, 78: 301-315.

2012년 2월 14일 원고접수

2012년 5월 3일 수정본 접수

2012년 5월 3일 수정본 채택

담당편집위원: 강동진