

## Review

## 연안해역 생태계 건강성 평가의 의미와 국내 적용 방향

김영옥<sup>1\*</sup> · 심원준<sup>1</sup> · 염기대<sup>2</sup><sup>1</sup>한국해양연구원 남해연구소  
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목리 391<sup>2</sup>한국해양연구원  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

## Implications for Coastal Ecosystem Health Assessments and Their Applications in Korea

Young-Ok Kim<sup>1\*</sup>, Won Joon Shim<sup>1</sup>, and Ki-Dai Yum<sup>2</sup><sup>1</sup>South Sea Research Institute, KORDI  
Geoje 656-830, Korea<sup>2</sup>Korea Ocean Research and Development Institute  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

**Abstract :** Coastal marine ecosystems continue to suffer unrelenting pressures from human population growth, increased development, and climate change. Moreover, these systems' capacity for self-repair is declining with such increases in anthropogenic production of various pollutants. What is the present health status or condition of the coastal ecosystem? If our coastal areas are unhealthy, which conditions are considered serious? To answer such questions, the United States, Canada, and Australia are currently assessing coastal ecosystem health using systematic monitoring programs as well as identifying and implementing management plans to improve the health of degraded coastal ecosystems. To evaluate marine environments, Korea is currently using a limited number of factors to estimate water quality. In fact, we are ill-prepared for assessing coastal ecosystem health because no biologically specific criteria are in place to measure the responses to various pollutants. We should select ecosystem-specific indicators from physicochemical stressors and evaluate the subsequent biological responses within each ecosystem. Furthermore, a set of practical indicators should be generated by considering the characteristics and uses of a local coastal area and the key issues at hand. The values of indicators should be presented as indices that allow understanding by the general public as well as by practitioners, policy makers, environmental managers and other stakeholders.

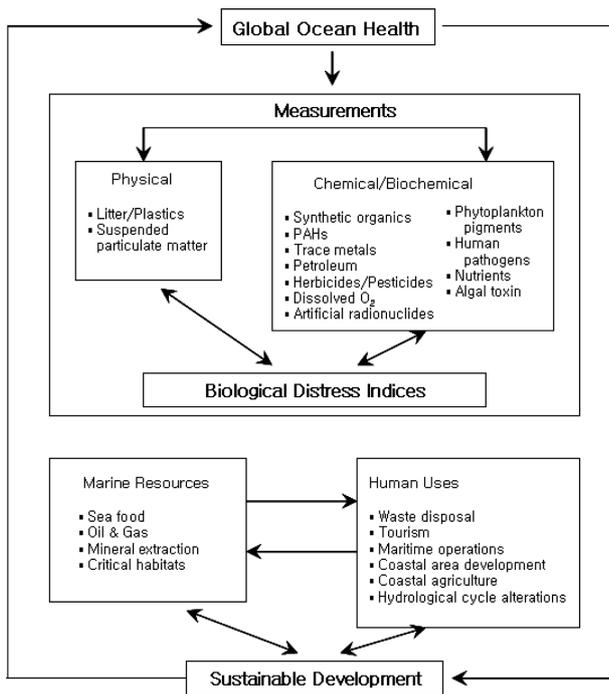
**Key words :** coastal ecosystem health, environmental assessment, indicator, index

## 1. 서 론

하구역, 연안습지, 갯벌과 같은 조간대 수역은 연안해역의 대표적 생물 생산지로 꼽힌다. 하구역은 담수와 해수가

혼합되는 수계로서 고유의 수환경이 조성되어 해양생물의 높은 생산성이 지속된다. 연안습지는 해양생물에게 훌륭한 서식처를 제공하고 동시에 외부의 물리적 압력의 완충지가 되며, 갯벌은 다양한 해양생물의 산란, 번식, 섭식, 휴식의 최적지라 할 수 있다. 한마디로 연안해역은 해양생물 생산활동의 중심지라 할 수 있다. 인간 생산활동의 측

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



**Fig. 1. Relationship between global ocean health and sustainable development (modified from UNESCO 1996).**

면에서도 연안역은 육로와 해로를 연결하는 지정학적 장점으로 대도시의 해안선을 따라 집중적으로 발달되어 있다. 지구촌 인구의 60-70%가 연안역의 도시에 거주하고 있으며 동시에 이곳에서의 경제활동은 큰 비중을 차지하고 있다(US EPA 2004). 활발한 경제활동과 동시에 파생되는 인위적 오염의 배출로부터 직접적 영향을 받는 영역도 연안해역이다. 해양오염은 육상활동에 기인한 오염이 약 80%로 보고되어 있다(UNESCO 1996). 다시 말해 연안해역은 인간의 경제활동의 긍정적 결과와 부정적 결과가 동시에 극대화된 곳이다. 기존의 연안해역의 관리는 인간 생산적인 결과에 치중하여 전개되어 현재 많은 문제점을 드러내고 있다. 해양생물과 인간, 양자가 모두 건강한 생존을 영유하는 윈윈전략으로 연안해역의 관리는 그 방향의 수정을 요구하고 있다(Xu et al. 2004). 생태계는 생물과 무생물이 공존하는 시스템으로 시스템의 각 구성요소를 충분히 이해하고 그 특성을 반영하여 관리해야 해양자원을 지속적으로 인류가 영유할 수 있음을 관련 국제기구들은 강조하고 있다(Fig. 1). 따라서 국내에서도 이에 대응하는 적절한 방안이 마련되어야 하며 이 같은 방안의 하나가 연안생태계 건강도 평가라 하겠다. 본 총설은 해역 생태계 건강성의 개념을 이해하고 국내 해역의 건강 상태와 국의 선진 평가사례 및 국내 해역 환경평가의 한계성 나아가 차후 국내 연안 해역 건강성 평가를 위한 방향을 제시하고자 한다.

**연안해역 생태계의 건강성**

생태계 건강은 이론적 개념이 Rapport에 의해 도입되어 지난 20년간 많은 학자들의 논의 대상이 되어 왔다 (Rapport et al. 1980; Rapport 1998, 1999). Constanza (1992)는 생태계 건강의 요소를 항상성, 무병성, 안정성과 회복성, 성장과 활성, 균형성에 두고 종합적 건강지수(HI; overall health index),  $HI = V \times O \times R$  (V: 생태계 활력, O: 생태계 유기력, R: 생태계 회복력)로 표현하였다. 생태계의 활력, 유기력, 회복력에는 이들을 잘 대변하는 적절한 지표(indicator)가 요구되며, Jørgensen 등(2005)은 생태계 건강 평가(Ecosystem Health Assessment: EHA)를 위해 어떻게 지표를 선별하는가에 대해 정리하였다. 건강성 평가를 위한 지표의 선별요건은 첫째, 지표는 생태계 구조와 기능에 관련성이 있어야 하며, 둘째로 지표는 조합을 통해 선별되어야 하고, 셋째로 지표는 공인된 기준을 갖춘 가이드라인에 의해 선별되어야 한다고 언급하고 있다.

건강한 바다는 자연의 모습을 그대로 간직하며 바다 생물이 서로 어우러져 살며 각종 수산물이 풍성하게 수확되고 쾌적한 레저활동이 가능한 이미지를 떠올린다. 이러한 피상적인 모습이 1990년 이후 과학적 개념으로 해양생태계건강(Marine ecosystem health: MEH)이라는 용어로 설명되기 시작하였고, MEH는 “바다생물이 활성이 있고, 구조와 유기적 관계를 유지하고, 시공간적 넓은 범위의 스트레스에 저항력이 있는 상태”로 정의되었다(Epstein 1999). 생태계의 건강에서 언급했듯이 MEH의 평가도 적절한 지표의 선별이 우선되어야 한다. 예를 들면 미국 US EPA(2001)에서 선별한 지표로 투명도, 용존산소, 연안습지, 부영양조건, 퇴적물, 저서생물, 어류조식을 들 수 있으며, 캐나다 해역 건강평가 5대 지표로 1) 오염물질, 2) 생물독, 병원체, 질병, 3) 생물다양성과 생물크기, 4) 일차생산과 영양염, 5) 불안정성을 평가지표로 선별하고 있다(Vandermeulen 1998).

**국내 연안해역의 건강상태와 진단**

국내해역에서도 1980년대부터 생태계교란 및 오염현상이 빈번히 감지되고 있다. 외래종 유입에 의한 토착종의 교란, 빈번한 적조 발생, 백화현상, 연안 습지의 감소 등을 불건강 신호로 들 수 있다. 이러한 불건강 신호를 어떻게 측정하고 어떤 기준으로 평가해야 하는가에 대해 논의하고 방안을 강구해야 하는 시점에 직면하고 있으나 국내 연안해역 생태계 평가 지표와 체계적인 해역의 건강도 평가법은 부재하다.

국내 연안해역 현 상태의 정밀분석을 위해 해수, 퇴적물, 생물에서 선별된 측정항목을 시공간적으로 분석하고 국내 연안 수질 및 서식생물의 상태를 파악해야 한다. 측정항목의 예로 화학적 오염원, 적조와 미세조류 독성, 박

테리아 밀도, 양식장 환경(양식장 수질과 퇴적물 상태), 방파제의 건설(위치와 개수), 하천의 위치(관리, 비관리여부), 퇴적물의 상태, 영양염, 하수처리 및 효과 등을 선별할 수 있다. 이어 국내 연안 해역에서 대두되는 문제를 파악하고 이 문제를 해결하기 위한 방안의 틀을 잡아야 한다. 국내 연안 해역의 건강을 위협하는 핵심 이슈를 바탕으로 이를 모니터링하기 위한 지표와 최종 목표를 선택해야 하며 지속적 평가 프로그램을 통한 장기조사는 필수적이다. 학문적인 지식이 제한되어 있는 실제이용자나 정책개발자나 환경관리자들에게 쉽게 이해되는 용어의 표현도 강구되어야 할 것이다. 예로 캐나다 Fundy 만의 6대 현안은 토지 이용, 오염원과 병원체, 어업과 양식, 부영양화(영양염), 서식지 변화 및 훼손, 기후변화에 두고 있다 (Wells 2003, 2005).

### 국외의 해양생태계 건강성 평가 사례

외국의 경우 해역 건강 평가에 관한 체계적인 방법이 어느 정도 기틀이 마련되어 있으며 지속적인 연구를 통해 방법론의 타당성을 검토 수정하고 있다.

캐나다는 전 세계에서 가장 잘 마련된 수질, 저질, 생물에 대한 환경기준 및 이에 근거하여 선별된 지표와 지수를 활용하고 있다. 일반적으로 수질, 저질, 생물에 대한 오염물질의 환경기준이 단순히 숫자로 제시되고 있어, 단순한 절차에 의해 설정된 것으로 오해될 수 있으나 실제로는 각 오염물질에 대한 광범위한 모니터링 결과와 실험실 및 현장의 독성실험 결과를 집대성한 후, 전문가 그룹의 충분한 검토와 평가를 통해 완성된 것이다. 수십 년 간의 환경자료 및 독성자료의 데이터베이스로부터 기준을 설정한 후 15년 동안 쌓인 자료와 평가를 근거로 수질환경지수를 개발하여 사용하고 있으며, 현재도 많은 전문가 그룹 미팅에서 수질 환경지수의 문제점과 개선 방안을 논의하고 있다. 2002년부터 수질에 적용한 지수화 방식이 현재 퇴적물 지수에도 동일한 절차를 밟은 후 적용하고 있다. 이들 지수화 방식을 캐나다 뿐만 아니라 미국 등 다른 선진국에서도 가장 널리 쓰이고 있는 방식으로, 환경권고기준을 설정하는 지침을 이해하지 않고는 궁극적으로 캐나다 또는 미국에서 활용하고 있는 수질 및 저질 환경지수를 근본적으로 이해하는데 한계가 있다(CCME 1999).

미국의 경우 미국 환경청에서 전국 연안의 오염현황을 지표화하여 2001년과 2005년에 “National Coastal Condition Report”를 발표하였다. 이 보고서에 의하면, 연안역의 오염현황을 평가하기 위해 미국의 48개주 연안에서 2,703정점에서 5대지수를 개발하여, 미국의 전국 연안 환경을 3등급(Good, Fair, Poor)으로 평가하였다. 5대 지수는 수질지수, 퇴적물지수, 저서환경지수, 연안서식환경지수, 어류조직지수로 구성되고 있다. 수질지수는 질산염,

인산염, 클로로필 *a*, 투명도 그리고 용존산소를 5가지 세부 지표 값으로 부터 통합 지수화하였다. 퇴적물지수는 퇴적물의 독성, 오염정도, 유기물함량의 3가지 지표를 통합적으로 해석하여 지수화하였다. 저서환경지수는 오염에 민감한 저서생물들의 군집특성을 분석하여 지수화하였고 연안서식환경지수는 습지에 적용되는 환경지수로서 퇴적상과 생물상 등을 분석하여 지수화하였다. 어류조직지수는 어류에 포함된 오염물질의 함량을 분석하여 정해진 기준 값과 비교하여 지수화하고 있다(US EPA 2004).

호주의 경우 “The Ecosystem Health Monitoring Program (EHMP)”이라는 프로그램을 통해 담수, 기수 및 해양 등 모든 수계를 동시에 평가하고 있다. 이 프로그램은 South East Queensland(SEQ) 지방정부에 의해 진행 중인 생태계 건강 모니터링 프로그램으로 Queensland 정부, 대학 및 관련 연구기관 등에 의해 공동으로 추진되고 있는 모범적인 사례라 할 수 있다. 연안의 오염은 주로 육상유입원에 기인하므로 주요 오염원 유출지를 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다. EHMP에서는 Ecosystem Health Index(EHI) 및 Biological Health Rating(BHR)의 지수를 개발하여 전 수역의 생태계 건강 모니터링을 실시하고 있다. 특히, BHR의 경우 생물지표로부터 산출되며, 지역 특성에 따라 잘피의 분포 범위, 산호 군락의 크기 등을 고려하여 1에서 5까지의 점수를 부여하고 있다. EHI 80% 및 BHR 20%로 통합하여 학점처럼 A에서 F까지 Ecosystem Report Card를 발급하여 결과를 발표하고 있다. 그러나 지표로 이용되는 항목이 단순화되어 있고, 특히 생물학적인 요소가 제한되어 있음이 단점이라 할 수 있다(EHMP 2006).

유럽대륙은 발틱해, 지중해 및 대서양과 접해 있다. 최근 유럽통합을 계기로 유럽연합의 유럽환경기구(European Environment Agency, EEA)에 의해 해양생태계의 보호에 대한 정책이 개발되고 있으며 국지적 연구를 뛰어 넘어 동일한 평가기법을 이용한 범유럽 규모의 생태계 평가를 실현하고자 노력하고 있다. 대표적 관련 연구사업은 European Marine Monitoring and Assessment(EMMA)가 있으며, 세부적으로는 발틱해의 생태모니터링을 위한 Helsinki Commission, Baltic Maime Environment Protection Commission, 지중해의 오염저감을 위한 Horizon 2020 및 생물영향 파악을 주요 목적으로 하는 Biological Effects of Environmental Pollution(BEEP) 과제 등이 있다. Helsinki Commission의 경우 수산 양식에 의한 부영양화, 폐기물, 육상 운송 분야, 해상 운송 분야, 수산업의 환경영향, 해양 및 연안의 생물다양성 보호 및 보전을 주요 연구 내용으로 추진하고 있으며, Horizon 2020의 경우 지중해 전 지역에 걸친 오염도의 저감, 바다와 연안의 지속가능한 이용의 증진, 인접국들의 환경이슈 동참을 유도, 환경 보호와 관련된 연구기관 설립 원조, NGO 및 정부기관의

**Table 1. The integrative indicators for assessing the health of Tolo Harbour coastal ecosystem (Xu et al. 2004).**

Ecological indicators		Relative healthy state	
		Good	Bad
Stress indicators	Water gathering area	Smaller	Larger
	BOD loading	Smaller	Larger
	Nutrient loading	Smaller	Larger
Physical response indicators	SD	Larger	Smaller
	Suspended solids	Lower	Higher
	Turbidity	Lower	Higher
	Dilution capacity	Larger	Smaller
Chemical response indicators	DO (bottom)	Higher	Lower
	Aggregate organics (BOD <sub>5</sub> )	Lower	Higher
	Nutrients (N, P)	Lower	Higher
	Bacteria level	Lower	Higher
Biological response indicators	Mangrove biomass	Lower	Higher
	Chl. <i>a</i> concentration	Lower	Higher
	Phytoplankton biomass	Lower	Higher
	Number of red tide occurrences	Lower	Higher
	Ratio of diatoms/dinoflagellates	Higher	Lower
	Species abundance	Higher	Lower
	Species diversity	Higher	Lower
Ecosystem-service-function	Sea food productivity	Higher	Lower
	Sea food quality	Better	Worse
response indicators	Marine farming	Yes	No
	Recreation (bathing, diving)	Yes	No
	Aesthetic enjoyment	Yes	No

환경정책 수립에 기여를 목표로 하고 있다. BEEP Project는 화학, 생물학, 생화학 및 생태독성학 분야의 프로젝트로 세포 및 분자수준의 바이오마커를 개발하여 오염물질의 생물영향을 조기에 경보하고 생식선 및 호르몬 장애와 관련된 바이오마커를 개발하여 집단/군집의 변화를 예측함을 과제의 목표를 두고 있다(Burlando et al. 2006).

우리나라 인접국으로 중국은 국가적 차원의 지원으로 수서 생태계 건강도 평가를 실시하였으며 주로 하천과 호소를 중심으로 즉 담수권에서 활발하게 추진하여 왔다(Xu et al. 1999, 2001a,b). 해역에서는 최근에 홍콩의 Tolo Harbour에서 항만 평가가 처음 보고되었고(Xu et al. 2004, 2006), 항만의 환경을 위협하는 요인을 규명하고 이들 요인에 대한 생태계의 반응을 분석 후, 지표를 설정하고 평가방법을 개발하여 정량, 정성적 건강도 평가를 소개하고 있으며 차후 중국의 타 연안역에서 수정 보완된 방법을 적용하고자 노력하고 있다(Table 1).

일본은 중국과 우리나라보다 해역과 밀접한 나라임에도 불구하고 현재까지 해역의 건강성 평가 사례는 없으며 해역환경평가가 이를 대신하고 있다. 일본의 해역수질환경 기준은 우리나라의 기준과 거의 동일하다(김 2006). 우리

나라와 마찬가지로 대상항목에 따라 생활환경 보전을 위한 기준과 사람의 건강보호에 관한 기준으로 구분된다. 해역의 생활환경보전 기준은 pH, COD, DO, 대장균군수, 유분의 5개 항목을 A, B, C급으로 환경기준을 설정하였으며 총질소와 총인은 4등급으로 나누어 차별화 하였으며 수산생물의 서식과 관련하여 아연의 농도를 설정하고 있다. 사람의 건강보호에 관한 기준으로는 중금속과 유기화합물을 포함하는 23개 항목을 설정해 놓고 있다. 일본의 수질기준의 문제점은 기술적으로 처리 가능한 배출수 기준치를 기준으로 일률적으로 희석률 10배를 적용하여 수질 기준치를 설정하고 있다는 점이다(岡田 2003).

#### 국내 해역 환경 평가와 문제점

현재 우리나라 해양생태계의 건강도를 평가하거나, 환경오염의 상태를 종합적으로 비교 평가할 수 있는 방법은 없다. 해양환경의 오염현황 및 변화추세를 보여줄 때 가장 많이 사용하는 것이 화학적 산소요구량(COD)을 근거로 나누어진 수질등급이다. 수질기준이 현실적인 수질과 이 수목적에 따른 등급과 목표를 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 미국이나 유럽의 국가들이 적극적으로 반영

하고 있는 세분화된 이화학적 수질기준과 이와 병행하여 생물/생태학적인 지표를 적극적으로 반영하고 있는 것과 차이가 있다. 현재 우리나라 해양환경의 질을 평가하기 위하여 사용하고 있는 방법의 문제점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 제한된 이화학적 수질평가 방법에만 의존하고 있다. 수질오염이란 수계 내로 유입되는 산소를 소비하는 유기물과 무기 영양염 뿐만 아니라, 최근에 문제가 되는 중금속과 유해화학물질도 같이 유입된다. 다양한 오염원의 유입에 불구하고 현재 우리나라의 해양평가의 이화학적인 지수는 극히 제한된 유기물과 무기 영양염 위주로 되어 있다.

둘째, 현재 국내에서 설정된 해양환경기준은 수질에 국한되어 있다. 실제로 해양으로 유입되는 오염물질은 퇴적물에 저장 농축되는 경향이 있다. 해양에서의 퇴적물은 오염물질을 저장고인 동시에 다시 수계로 오염물질을 배출시키는 공급원의 역할도 수행한다. 현재 국내에는 해양퇴적물의 오염을 평가할 수 있는 기준이 전혀 설정되어 있지 않다. 선진국에서는 수질은 물론 퇴적물의 질에 대한 오염물질의 환경기준이 설정되어 있을 뿐만 아니라, 퇴적물의 오염 및 저서생물의 건강성을 평가할 수 있는 다양한 화학적, 독성학적, 생물학적 기법이 개발되어 있고, 제도적으로 도입되어 활용되고 있다.

셋째, 이화학적인 요소의 농도기준에 의해 오염을 평가를 하고 있다. 특히 항목의 기준 농도 설정의 근거가 명확하지 않고, 구체적으로 명기되어 있지 않아 해당 기준 농도 수준이 어떤 환경적 의미를 지니는지 알 수 없다. 또한 오염물질의 농도기준은 일차적인 환경의 상태를 평가하는 수단은 될 수 있으나, 이들이 해양생태계의 생물개체, 개체군, 군집 등과의 상호 연관성에 의해서 나타나는 생물학적인 현상과 연결하여 설명할 수 있는 방법은 없다. 선진국의 경우는 오염물질의 농도뿐만 아니라 수생태계 내에 존재하는 생물이 오염물질에 의해 받는 영향을 함께 포함하고 있다. 따라서, 수질오염현상을 평가하기 위해서는 오염물질의 농도라는 이화학적인 기준 뿐만 아니라 다양한 생물학적인 평가가 병행될 때 보다 정확한 수질평가가 가능하다.

넷째, 해양환경 및 생태계의 건강도를 종합적으로 평가할 수 있는 기준 및 제도적 장치가 부재하다. 국외의 사례에 제시한 것처럼 선진국에서는 해양생물을 오염으로부터 보호하기 위하여 수질과 퇴적물의 권고기준을 뚜렷한 과학적 근거를 가지고 설정했을 뿐만 아니라, 이들 기준들을 종합한 지수를 개발하여 체계적으로 전국 연안의 수생 생태계를 비교할 수 있도록 하고 있다. 또한 생태계 건강성 역시 다양한 생물학적 지표를 종합한 지수를 개발하여 평가하고 있으며, 특정 해역에 맞는 지수들 역시 별도로 개

발하여 사용하고 있다. 하지만 국내의 경우 서로 다른 접근법에 의한 서로 다른 변수들을 이용하여 해역의 환경오염을 평가하고 있어 정책 및 관리방안을 마련하기 어려운 실정이다.

다섯째, 국내에서는 해양생물에 잔류하는 오염물질이 먹이망 상위단계의 생물에 미치는 영향이나 수산물 섭취를 통해 인체의 건강성에 미치는 영향을 고려한 보호기준이 마련되어 있지 않다. 이는 야생생물을 보호할 수 있는 장치가 전혀 마련되어 있지 않다는 것이며, 아울러 국민의 단백질의 주요 공급원인 수산물의 안전성을 확보할 장치가 마련되어 있지 않다는 것이다. 미국과 캐나다 등 선진국에서는 잔류성과 독성이 강해 먹이망을 통해 생물농축되는 주요 오염물질에 대해서는 수서생물을 주요 먹이원으로 하는 주요 야생동물(새 및 포유류) 및 인간을 보호하기 위한 오염물질 권고기준이 마련되어 있으며, 정기 모니터링을 통해 상태를 파악하고 있다. 특히 우리나라의 경우 먹거리에 대한 국민적 불신의 가중으로 특정 오염식품에 대한 보도 이후에 유사한 다른 먹거리까지 영향을 받는 문제가 항상 발생하고 있는 실정이다. 따라서 수산물 안전성에 대한 국민의 불신을 해소할 수 있는 과학적인 근거를 마련해 놓고 이에 대한 정보를 공개함으로써 소비자가 직접 위해성이 낮은 먹거리를 선택할 수 있도록 한다는 점에서 국내에서도 향후에 꼭 도입되어야 할 부분이라 하겠다.

여섯째, 통합된 지표 및 지수를 활용할 수 있는 표준화된 조사방법이 미비하고, 이로 인해 자료의 통일성과 호환성이 낮아 효율적인 자료이용에 어려움이 있다. 현재 표준화된 조사법으로는 국가해양환경측정망으로 수집되는 자료가 있으나 항목이 제한되어 있으며, 자료의 신뢰성 확보와 관리에 관한 근거가 명시되어 있지 않아 활용에 문제가 야기되기도 한다. 미국의 경우, 국가에서 인정한 기관에서는 표준화된 분석방법을 이용하고 이를 체계적으로 관리하고 이용하는 신뢰성 확보와 관리에 기초한 자료수집 및 관리체계를 구축하여 광역적으로 이용하고 있다. 이러한 부분은 매우 중요한 사안이므로 향후 평가 기법의 개발과 더불어 수질자료의 신뢰성과 이용의 효율성의 문제로 과학적이고 정책적으로 뒷받침되어야 할 문제이다.

### 국내 연안생태계 건강성 평가를 위한 방안 평가지표의 선별

연안생태계에 가해지는 인위적 압력의 종류는 매우 다양하다. 그 중 국내의 연안해역과 관련 깊은 인위적 압력은 Table 2와 같이 구분될 수 있다. 국내 연안생태계의 건강도 평가지표는 이러한 인위적 압력의 종류에 따라 측정 항목을 설정하고 기반 환경요인을 측정하여야 한다. 측정된 무생물적 환경요인과 생물적 요인과의 관계를 조사함

**Table 2. Preliminary indicators of anthropogenic stresses for Korean coastal ecosystem health assessment.**

Anthropogenic stresses	Stress details
Biological stresses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exotic species</li> <li>• Aquaculture</li> <li>• Climate change</li> </ul>
Chemical stresses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eutrophication (inorganic &amp; organic nutrients)</li> <li>• Oiling</li> <li>• Heavy metals, pesticides, PCB etc.</li> </ul>
Physical stresses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coastal building (breakwater &amp; bridge)</li> <li>• Coastline change (habitat loss)</li> <li>• Warm water discharge</li> </ul>

**Table 3. Hypothetical indicators considered on the biological habitat zonation.**

Habitat zonation	Indicator groups	Sub-indicators
Water column	Biological indicator	Plankton & Fish
	Chemical indicator	Water quality
	Physical indicator	Current
Tidal zone	Biological indicator	Sea glass & Macroalgae
	Chemical indicator	Chemical contamination in mussel
	Physical indicator	Tidal habitat
Bottom	Biological indicator	Benthos
	Chemical indicator	Sediment quality
	Physical indicator	Bottom habitat

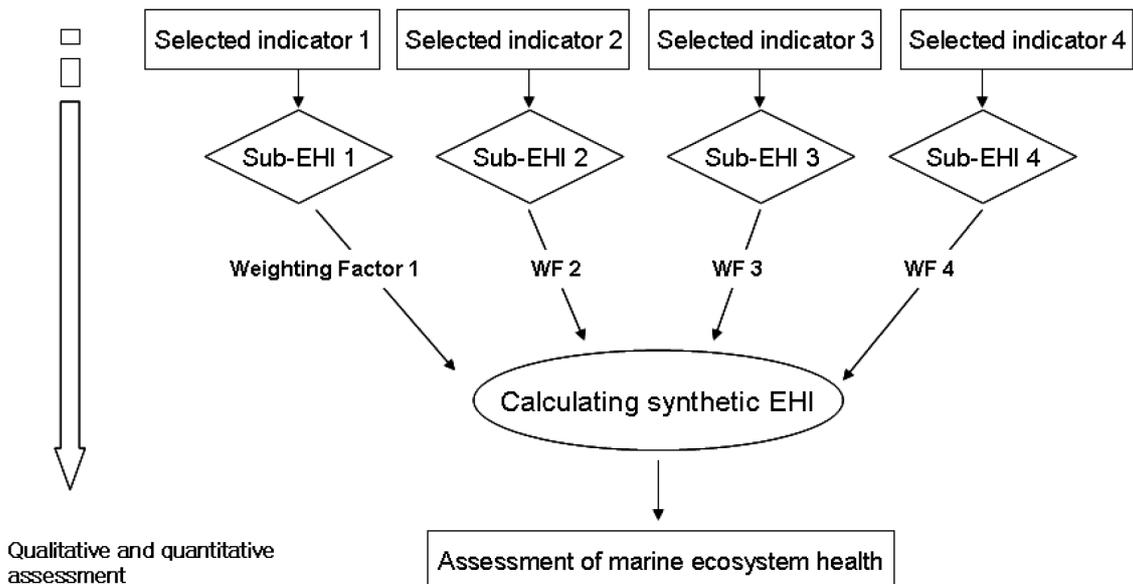
으로 압력에 대한 생물학적 반응을 파악하고 압력과 반응의 관계가 명확히 표출되는 경우를 실용적 지표로 선별할 수 있다.

연안해역의 생물은 서식지에 따라 크게 부유생물, 유영생물, 저서생물, 조간대생물로 구분된다. 인위적 압력의 영향은 공간적으로 균일하지 않으므로 공간적 분포가 다른 생물군의 반응도 그 차이를 보이게 된다. 따라서 연안해역의 건강도 평가는 생물의 서식지를 고려하여 수중생태계, 저서생태계, 조간대생태계로 나누어 각 생태계의 특성이 충분히 반영되는 물리, 화학적 환경과 서식 생물의 반응을 토대로 지표를 선별함이 바람직하다(Table 3). 각 세부지표의 측정 항목은 조사해역의 특성을 반영하여 선택되어야 하며 각 공간의 세부지표를 종합하면 수 환경 전체의 상태가 조명될 수 있다. 세부지표의 중요 조사항목은 본 특별호 내에 함께 수록된 분야별 논문에서 자세히 언급되고 있다.

**평가지수의 산출**

대표적 연안해역 평가 보고서인 미국의 National Coastal Condition Report II의 경우, 5대 지표(Water Quality Index, Sediment Quality Index, Benthic Index, Coastal Habitat Index, Fish Tissue Contaminants Index)를 설정하고 각 지표로부터 일차적 지수를 구하였고, 이어 이들 지수의 평균치를 구해 해역평가의 종합지수로 산출하였다. 호주의 South East Queensland(SEQ)에서 Ecosystem Health Index(EHI)의 산출은 5대 지표(Total nitrogen, Chl.

Determination of assessment methods



**Fig. 2. Procedure of weighted Ecosystem Health Index (EHI) method for marine ecosystem health assessment.**

*a*, Secchi depth, <sup>15</sup>N mapping, *Lyngbya*)를 선별하여 각 지표 값을 측정하여 평균하여 Ecosystem Health Index (EHI)를 구하였다. 따라서 국내 경우도 선별된 지표를 통해 얻는 측정값을 일정한 범위로 환산하여 지표항목에 따른 지수를 구하고 다시 이들 지수를 평균하여 종합지수로 사용할 수 있다. 그러나 이 경우 해역의 특성과 평가 이슈에 따른 각 지표의 중요도가 반영되지 않은 단점을 가지고 있다.

상기의 평균값에 의한 종합지수 산출법의 단점을 보완하기 위해 각 지표항목으로부터 얻어진 지수값에 가중치 (weighting factor)를 주어 종합지수를 산출하는 가중치 부여법이 있다(Xu *et al.* 2005). 아래의 모식도와 같이 지표 간의 상관관계에 의해 가중치를 계산하고, 각 지표의 지수에 가중치를 곱하여 종합지수로 계산한다(Fig. 2).

**평가규모에 따른 차별화**

사람의 건강진단의 경우 기본종합진단과 맞춤형진단으로 크게 나누고 있다. 국내 해역 생태계의 경우도 평가규모에 따라 대규모, 중규모, 소규모로 구분할 수 있다. 대규모 평가 시에는 광범위한 해역에 동일한 지표를 적용하여 평가하므로 지표는 지역적으로 활용되어야 하며 동시에 분석되어야 할 지표의 수는 적어야 한다(Fig. 3).

대규모의 전국적 평가 시에는 연안역 전체를 잘 반영하는 지표의 선별이 중요하다. 상대적 평가 영역이 넓어 동시에 조사해야 하는 조사정점의 수가 많다. 따라서 지표는 실용화를 극대화시키는 방향으로 선별되어야 한다. 즉, 민감성이 높은 소수의 지표를 기본지표세트로 선별해 평가하는 기본종합진단에 해당된다. 중규모 해역별 평가 시에는 기본지표세트 뿐 아니라 평가하는 해역의 고유 특성을 반영하는 지표를 추가하여 해역의 건강도를 평가한다. 따라서 1차적 세부종합진단이라 할 수 있다. 해역별 평가지표세트 (남해안평가지표세트, 동해안평가지표세트, 서해안평가지표세트)를 설정하여 평가 할 수 있다. 소규모인 만규모, 특정 기수역 규모, 기타 오염 집약지 규모를 평가할

경우 평가수역 고유의 특성을 반영하는 지표를 선별하고 지표 세트에 추가하여 지표 항목을 더욱 세분화한다. 소규모 해역의 평가는 맞춤형 해역 평가에 해당된다. 예를 들면 순천만의 경우는 잘피의 서식면적, 진해만의 경우는 유해조류의 밀도, 외국 선박으로부터 배출수량이 가장 많은 부산항의 경우는 외래종과 같은 각 평가해역의 지리적 특성에 따른 평가 지표 항목을 이차적으로 보완함이 바람직하다.

**평가 시스템 구축과 공동의 노력**

연안해역의 환경문제는 오래전부터 인식되어 왔다. 이 문제에 대한 부분적 접근에 의한 짜 맞추기 식의 방법론의 해결은 한계성을 드러내고 있다. 따라서 체계적인 시스템 구축에 의한 해결방안이 모색되어야 한다. 우선 정부의 정책적 계획이 수립되어야 하며, 이를 바탕으로 기반시설의 확충이 따라야 할 것이다. 이어 타당한 방법론에 의한 장기적인 현장조사를 통해 해역의 환경이 평가되어야 하며 그 결과를 토대로 해역의 생태계는 보다 빠르게 이해될 수 있다. 이러한 이해는 다시 정책을 업그레이드시킬 수 있는 정보로 제공되므로 순환시스템으로 전개될 수 있다.

연안해역 생태계 건강을 지키기 위해 과학적 해결 노력과 동시에 정부, 사회, 시민에 이르기까지 공동의 추진세력이 있어야 한다. 과학자는 문제 제기→문제 조율→연구→분석의 방향으로 나가야 하며, 동시에 연안해역의 문제를 직시→정책→결과와 계획→기반시설 확충의 방향은 정부를 비롯한 공공의 몫이 될 것이다. 이 두 방향 즉 과학과 실천은 상호 협력을 통하여 한 방향으로 즉, 연안해역 생태계 건강 지킴이로 연대하여야 건강한 우리 해역을 후손에게 물려줄 수 있을 것이다.

**2. 결 론**

연안해역의 생태계는 인구집중, 경제개발, 기후변화와 같은 요소로부터 피할 수 없는 압력 하에 있으며 인위적 생산의 증가와 함께 연안 생태계는 자연 치유능을 상실하고 있다. 우리가 영유하고 있는 연안해역이 얼마나 병들어 있는가? 어디가 치명적인 상태인가? 그 대답을 얻기 위해 미국, 캐나다, 호주와 같은 선진국에서는 해역 건강도 평가법을 마련하여 연안환경의 체계적인 감시와 관리방안을 마련하고 있다. 국내 해역평가는 몇몇 항목에 의한 수질평가에만 국한되어 있으며 생물학적 평가법이 매우 제한되어 있다. 생물의 서식공간을 반영하여 각 공간을 대표하는 생물, 화학, 물리적 지표를 선별함이 바람직하며, 동시에 해역의 특성과 규모와 함께 평가 이슈를 고려하여 각 지표를 선별하여야 한다. 측정된 지표 결과를 지수화 하여

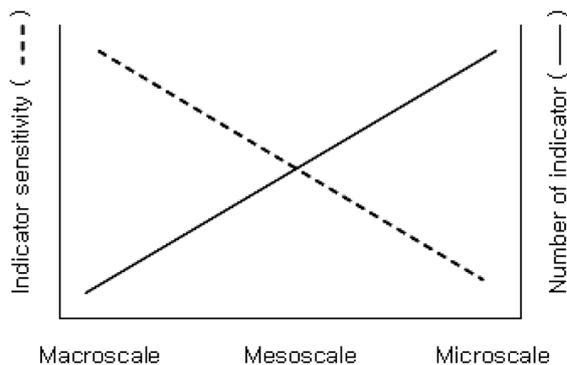


Fig. 3. Relationship between indicator sensitivity and indicator number on the assessment scales.

해역환경의 변화를 보다 쉽게 이해할 수 있는 표현방법도 강구되어야 할 것이다.

## 사 사

본 연구는 2007년도 한국해양연구원 정책사업 “연안해양 건강도 평가를 위한 기반구축연구(PE97904)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 본 충설을 위해 자료를 제공해 주신 한국해양연구원 참여연구원들과 충설을 검토해 주신 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- 김영옥. 2006. 연안해양 건강도 평가 기술 개발을 위한 기획 연구. 한국해양연구원. BSPE97512-1817-7. 216 p.
- 岡田 誠之. 2003. 環境をはかる-水質-. 空氣調和・衛生工學, 77, 959-967.
- Burlando, B., E. Berti, and A. Viarengo. 2006. Effects of seawater pollutants on protein tyrosine phosphorylation in mussel tissues. *Aquat. Toxicol.*, 78, 79-85.
- CCME. 1999. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Polychlorinated biphenyls (PCBs). Chapter 6. In: *Canadian environmental quality guidelines*. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, MB.
- Constanza, R. 1992. Toward an operational definition of ecosystem health. p. 239-256. In: *Ecosystem Health*. Island Press, Washington, DC.
- EHMP. 2006. Ecosystem health monitoring program 2004-05 annual technical report. Moreton Bay Waterways and Catchments Partnership, Brisbane. 136 p.
- Epstein, P.R. 1999. Large marine ecosystem health and human health. p. 417-438. In: *The Gulf of Mexico Large Marine Ecosystem: Assessment, Sustainability, and Management*. Blackwell Science, Boston, MA.
- Jørgensen, S.E., F.L. Xu, F. Salas, and J.C. Marques. 2005. Application of indicators for the assessment of ecosystem health. p. 5-66. In: *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. CRC Press, Florida.
- Rapport, D.J. 1998. Dimensions of ecosystem health. p. 34-40. In: *Ecosystem Health*. Blackwell, Oxford.
- Rapport, D.J. 1999. Epidemiology and ecosystem health: Natural bridges. *Ecosyst. Health*, 5, 174-180.
- Rapport, D.J., C. Thorpe, and H.A. Regier. 1980. Commentary: Ecosystem medicine. p. 180-189. In: *Perspectives on Adaptation, Environment and Population*. Praeger, New York.
- UNESCO. 1996. A strategic plan for the assessment and prediction of the health of the ocean: a module of the Global Ocean Observing System (GOOS). Intergovernmental Oceanographic Commission. 39 p.
- US EPA. 2001. National Coastal Condition Report. Office of Research and Development/Office of Water, Washington, DC. 204 p.
- US EPA. 2004. National Coastal Condition Report. Office of Research and Development/Office of Water, Washington, DC. 286 p.
- Vandermeulen, H. 1998. The development of marine indicators for coastal zone management. *Ocean Coast. Manage.*, 39, 63-71.
- Wells, P.G. 2003. Assessing health of the Bay of Fundy-concept and framework. *Mar. Pollut. Bull.*, 46, 1059-1077.
- Wells, P.G. 2005. Assessing marine ecosystem health-concepts and indicators, with reference to the Bay of Fundy and Gulf of Maine, Northwest Atlantic. p. 395-430. In: *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. CRC Press, Florida.
- Xu, F.L., J.Y. Hao, S. Tao, R.W. Dawson, K.C. Lam, and Y.D. Chen. 2006. Restoration of marine coastal ecosystem health as a new goal for integrated catchment management in Tolo Harbor, Hong Kong, China. *Environ. Manage.*, 37, 540-552.
- 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, F.L., R.W. Dawson, S. Tao, J. Cao, and B.G. Li. 2001a. A method for lake ecosystem health assessment: An ecological modeling method and its application. *Hydrobiologia*, 443, 159-175.
- Xu, F.L., S.E. Jørgensen, and S. Tao. 1999. Ecological indicators for assessing freshwater ecosystem health. *Ecol. Model.*, 117, 239-260.
- Xu, F.L., S. Tao, R.W. Dawson, B.G. Li, and J. Cao. 2001b. Lake ecosystem health assessment: Indicators and methods. *Water Res.*, 35, 3157-3167.
- Xu, F.L., Z.Y. Zhao, W. Zhan, S.S. Zhao, R.W. Dawson, and S. Tao. 2005. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment. *Ecol. Model.*, 188, 327-339.

Received Nov. 1, 2007

Accepted Dec. 13, 2007