Article

마산만 저서생태계를 중심으로 연안해역 건강성 평가를 위한 저서생물지수의 적용

최진우* · 서진영

한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목리 391

Application of Biotic Indices to Assess the Health Condition of Benthic Community in Masan Bay, Korea

Jin-Woo Choi* and Jin-Young Seo

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

Abstract : In this work, we compared the characteristics of three benthic biotic indices (BPI, AMBI, BIBI) which indicates the health condition of benthic communities in Masan Bay, Korea where anthropogenic impacts have been concentrated. Also we evaluated the usefulness of these benthic indices and some problems if they were applied to the Korean coastal waters. For this we used the macrozoobenthos data collected using van Veen grab (0.1 m²) at 21 sites in Masan Bay in February and August 2004. Based on the BPI values, two stations in the inner bay were found in a very hard polluted condition and three stations in the middle bay were also in a highly polluted condition. Only one station located in the bay mouth was in a normal condition. The inner bay stations showed very high AMBI values (≥ 5.0), indicating a highly polluted condition. The bay mouth station was assessed in a moderately polluted condition. The overall BIBI values in Masan Bay were in the range between 1.0 and 3.0. The inner bay stations showed low BIBI values (≤ 2.0) in the severely degraded condition. The bay mouth station with high BIBI value over 3.0 was assessed as a normal condition. All three benthos indices showed that macrozoobenthic communities in the inner bay were in a seriously polluted condition all year round, and macrobenthic faunas in the bay mouth seemed in a bad healthy condition (slightly polluted) based on AMBI during summer season. These three benthic biotic indices showed the similar assessment result, and thus we consider that each of them is a useful tool for the assessment of coastal benthic ecosystems under the organic enrichment in sediment.

Key words : Benthic community health assessment, Benthic Pollution Index (BPI), Azti's Marine Biotic Index (AMBI), Benthic-Index of Biological Integrity (BIBI), Masan Bay

1. 서 론

해양무척추동물인 대형저서생물은 이동성이 적고 해양 플랑크톤에 비해서 상대적으로 긴 생활사를 가지고 있어 장기간에 걸친 서식지 환경을 잘 반영하고 있어, 서식지나

해역에 대한 환경모니터링의 대상으로 많이 사용되어 왔다. 특히 퇴적물에 서식하는 저서생물은 저서환경의 교란에 반응하는 내성 정도 차이가 다양하여 저서생물군집의 생태학적 천이과정과 군집의 건강구배를 잘 보여주고 있다(Pearson and Rosenberg 1978). 이러한 연안과 해양의 저서생물 군집은 오염물질에의 노출, 유기물 부하, hypoxia, 그 외 다양한 환경의 변화에 대한 생물학적 반응을 증명

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

해 주는데 폭넓게 사용되어지고 있다(Van Dolah *et al.* 1999). 환경 변화에 따른 저서생물군집의 변화상태를 알아보기 위해 우점종, 민감종, 내성이 강한 종 등을 대상으로 생물량, 개체수, 종다양성지수 등 주로 단변량을 측정하였으나(Berge 1990; Dauer 1993; Dauer and Alden 1995; Van Dolah *et al.* 1999), 최근에는 하구역과 같은 복잡한 구조를 가진 저서생태계의 건강도 여부를 평가하기 위해서 저서생물군집의 다양한 기능에 근거하여 도출한 다변수를 이용하여 산출되어진 저서생물지수들이 연안 및 해양의 생태학적 지시자로 제안되어지고 있다(Weisberg *et al.* 1997; Borja *et al.* 2000; 이 등 2003).

그 중 지표종을 이용한 지수인 AMBI(AZTI's Marine Biotic Index)는 Borja *et al.*(2000)에 의해 처음 제안되었고, 지역이 달라도 오염 원인이 달라도 잘 적용이 되어서, 최근 유럽에서 많이 사용되어지고 있다(Borja *et al.* 2000, 2003). 미국의 경우는 연안역 보전을 위한 정책결정 수단으로서 해역을 등급화하고, 등급화의 기준으로서 저서동물 군집을 이용한 생물통합지수(Benthic-Index of Biological Integrity; BIBI)를 개발하여 이용하고 있다. Chesapeake Bay의 생태상태를 정립하기 위해서 적용한 BIBI는 해역의 이화학적 요인, 저서생물군집의 종다양성 지수, 종풍부도, 종조성, 영양단계 등을 포함한 13가지 변수를 염분구배와 퇴적상의 종류에 따라 각각 적합한 변수를 사용하여 계산되었으며, 건강한 대조구 해역의 변수를 사용하였고, 여름철의 자료에 적용할 것을 권장하고 있다(Weisberg *et al.* 1997).

이외에도 생물체내 농도비율을 이용한 Ecological Reference Index(Langston *et al.* 1987; Reish and Gerlinger 1984), 생물량과 개체수에 기초한 Abundance-Biomass Comparison Method(Warwick 1986), 생태계의 전체 환경자료를 통합하여 산출한 Trophic Index(TRIX) (Wollenweider *et al.* 1998), 저서생물의 생활사 전략에 기초한 Nematodes/Copepods Index(Rafaelli and Masao 1981), Polychaetes/Amphipods Index(Bellan-Santini 1980), Infaunal Index(Word 1978) 등이 있다.

이처럼 국외에서는 다양한 지수를 이용한 방법들이 저서생태계의 건강성 평가에 적용되어지고 있으나, 국내에서는 저서생물을 이용하여 생태계 평가에 적용한 사례가 많지 않다. 진해만의 경우에도 과거에 가장 많이 사용한 지수는 종다양성지수(H')였고(Hong and Lee 1983; 임과 홍 1997), log-normal curve에 의한 그래프 방식으로 저서생물군집의 건강도를 평가하기도 하였다(임과 홍 1997). 오염지시종이나 민감종에 속하는 단각류의 군집조성 비율에 의해서 인천연안역에서의 저서생물군집의 건강성을 평가한 사례가 있지만(고 등 1997), 섭식유형의 조성에 기초하여 Infaunal Index를 수정한 저서생물지수를 사용하여

저서생물군집의 건강성을 평가한 사례는 많지 않았다. 최근 저서오염지수(Benthic Pollution Index, BPI)를 사용하여 광양만(최 등 2003), 마산만 및 진해만(최 등 2005; 임 등 2007), 시화호(이 등 2003) 등의 일부해역에서 저서생물군집의 건강도 평가를 실시하였다.

본 연구에서는 3가지 유형의 저서생물지수인 저서오염 지수, AMBI(AZTI's marine Biotic Index) (Borja *et al.* 2000), 저서생물통합지수(Benthic Integrity of Biological Index, BIBI) (Weisberg *et al.* 1997) 등을 마산만 특별관리해역에서 조사된 대형 저서동물군집의 건강성을 평가하는데 적용하였으며, 국외에서 사용되고 있는 생물지수들을 국내의 연안역 저서생물군집의 건강성 평가에 적용할 경우 발생하는 문제점을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

저서생물자료

저서생물지수를 산출하고 적용하기 위한 대상해역은 마산만 및 행암만을 포함한 특별관리해역이며(Fig. 1), 지수 산출에 사용된 자료는 마산만 특별관리해역의 21개 조사 정점에서 2004년 2월과 2004년 8월에 채집된 저서생물 자료를 이용하였다(최 등 2005). 대형저서동물의 채집은 van Veen 그림(채집면적 0.1 m²)을 사용하여 각 정점에서 4회씩 이루어졌고, 망목크기 1 mm인 체(sieve)에 걸러 남은 생물을 10% 중성포르말린으로 고정하였다. 실험실에

Fig. 1. A map showing the study area and sampling sites.

서 주요 분류군별로 선별한 후 습중량을 측정하였고, 가능한 중수준까지 동정하고 개체수를 조사하였다. 본 연구에서 사용된 저서생물군집 자료는 4개 시료를 합쳐서 각 정점별 하나의 자료로 사용되어졌다.

연구해역에서 출현하였던 저서생물군집의 구성원을 섭식유형과 생활사 유형에 대한 정보를 이용하여 4개의 기능군으로 구분하였다(Appendix 1). 아울러 AMBI산출을 위해서 5개 기능군으로 분류하였으며(Appendix 1), BIBI 계산에 필요한 오염민감종과 오염지시종을 선별하였다(Appendix 2).

저서생물지수

본 연구에 사용된 각 지수의 계산식과 각 지수산출에 적용된 가정은 다음과 같다.

(1) 저서오염지수(BPI)

$$BPI = [1 - \{(a \times N1 + b \times N2 + c \times N3 + d \times N4) / (N1 + N2 + N3 + N4) / d\}] \times 100$$

여기서 N1은 육식자나 여과식자의 개체수를, N2는 표층 퇴적물식자의 개체수를, N3는 표층 하퇴적물식자의 개체수를, N4는 오염지시종이나 기회종의 개체수를 나타낸다. 각 기능군의 출현개체수에 부과하는 가중치는 $a=0$, $b=1$, $c=2$, $d=3$ 으로 주어졌다. BPI=0이면 저서군집이 모두 오염지시종으로 구성되어 있는 경우이며, BPI=100이면 저서생물군집이 여과식자와 육식자만으로 구성되어 있음을 나타낸다. 무산소 상태의 무생물 조건에서는 BPI 값을 0으로 준다.

(2) AZTI's 생물지수(AMBI)

$$AMBI = [(0 \times \% GI) + (1.5 \times \% GII) + (3 \times \% GIII) + (4.5 \times \% GIV) + (6 \times \% GV)] / 100$$

여기서 GI은 유기물오염이나 교란이 있으면 현존량이 감소하는 민감종의 현존량 백분율을 나타내며, GII는 유기

물오염에 둔감하거나 무관한 저서생물의 현존량 백분율을, GIII는 유기물 오염에 내성을 가지고 있거나 약간 증가하는 저서생물의 현존량 백분율을, GIV는 2차 유기물 오염지시종의 현존량 백분율을, GV는 1차 유기물오염지시종의 현존량 백분율을 나타낸다. AMBI는 0-6까지의 값을 가지며, 무생물조건에서는 AMBI 값을 7로 준다.

(3) 저서생물통합지수(BIBI)

$$BIBI = \sum Mi / N$$

저서통합지수는 Pearson and Rosenberg(1978)의 군집 천이과정에 따른 군집의 생태학적 특성이 달라지는 것에 기초를 두고 있다. BIBI에서는 미국 체사피크만을 중심으로 하구에서 해안에 이르는 광범위한 지역을 포함시키기 위해서 염분구배와 퇴적상을 고려하여 7개의 서식지로 구분되어 종다양성지수, 저서생물 출현개체수, 생물량, 5 cm 저층에서 출현하는 저서생물의 비율 등 총 13개의 변수(metrics)가 선정되어 BIBI 계산에 사용된다. 본 연구에서는 마산만 특별관리해역이 7개 서식지 중에서 Polyhaline mud 퇴적상에 해당되므로 13개 metric 중에서 7개 변수들(metrics)만이 선택 되어졌다. 그러나 이중에서 퇴적물 깊이 따른 퇴적물식자의 개체수 변수는 자료가 없어서 제외되었으며, 오염지시종과 민감종에 대한 생물량 자료가 없었기 때문에 출현개체수의 비율로 대체되었다. 종다양성지수(H'), 출현종수, 서식밀도, 생물량, 오염지시종의 개체수 비율(%), 오염민감종의 개체수 비율(%) 등 6개 변수가 사용되었다. 7개 서식지 중에서 각 변수에 주어지는 가중치는 정상적인 군집상태를 보이는 대조구 해역의 군집에서 구해진 값의 범위를 기준으로 1, 3, 5 등으로 3가지 값이 주어진다. 본 연구에서는 마산만의 외곽에 위치한 정점(정점 21)을 대조구 정점으로 간주하였고, 이를 기준으로 각 metric의 값을 할당하였다(Table 1). 여기서 Mi는 이렇게 할당된 6개 metric의 score 값이다. N은 전체 변수의 갯수로서 본 연구에서는 6으로 주어졌다. 이렇게 주어진 각 항목의 값을 평균하여 각 조사정점의 저서생물통합

Table 1. Thresholds used to score metrics of BIBI applied to Masan Bay.

Polyhaline Mud	Feb., 2004			Aug., 2004		
	Scoring			Scoring		
	5	3	1	5	3	1
Shannon-Wiener	≥ 3.0	3.0	<3.0	≥ 1.7	1.7	<1.7
Abundance (Ind./m ²)	$\geq 1,428$	1,428	$<1,428$	$\geq 3,360$	3,360	$<3,360$
Biomass (g/m ²)	≥ 644	644	<644	$\geq 1,250$	1,250	$<1,250$
Abundance of pollution-indicative taxa (%)	≤ 8.0	8.0	>8.0	≤ 2.0	2.0	>2.0
Abundance of pollution-sensitive taxa (%)	≥ 34	34	<34	≥ 4.0	4.0	<4.0
Abundance of carnivores and taxa (%)	≥ 37	37	<37	≥ 13.0	13.0	<13.0

Table 2. The classification criteria of each benthic biotic index.

Condition/Index	BPI	AMBI	Condition/Index	BIBI
Normal	≥ 60	0-1.2	Meets restoration goals	≥ 3.0
Slightly polluted	40-60	1.2-3.2	Marginal	2.7-3.0
Moderately polluted	30-40	3.2-5.0	Degraded	2.0-2.7
Highly polluted	20-30	5.0-6.0	Severely degraded	≤ 2.0
Very highly polluted	≤ 20	6.0-7.0		

지수를 산출하였다.

(4) 저서생물지수를 이용한 저서생물군집의 건강 기준 이 등(2003)에 의하여 경기만의 시화호 저서생물군집에 적용된 BPI의 경우 크게 5개의 오염상태로 평가하였으며, 본 연구에서도 동일한 기준을 적용하였다(Table 2). 국외에서 사용되고 있는 저서생물지수에 있어서는 AMBI의 경우에는 현재 유럽에서 적용하고 있는 건강상태를 평가하는 기준을 채용하였으며, BIBI를 사용한 저서생물군집의 건강 상태에 대한 평가 기준은 Chesapeake Bay의 기준을 따랐다(Table 2). AMBI의 경우 정상적인 군집 상태는 $AMBI < 1.2$ 의 범위에 있었고, 약간 오염상태는 $1.2 \leq AMBI < 3.2$ 의 범위에, 중간 오염상태는 $3.2 \leq AMBI < 5.0$, 심한 오염상태는 $5.0 \leq AMBI < 6.0$, 극심한 오염상태는 $AMBI \geq 6.0$ 등으로 구분하였다. BIBI의 경우에는 $BIBI \geq 3.0$ 이면 정상적인 상태에 있는 저서생물군집을 나타내고, $3.0 > BIBI \geq 2.6$ 이면 약간 변형된 군집을 (marginal condition), $2.6 > BIBI \geq 2.0$ 이면 오염된 상태(degraded condition)를, $BIBI < 2.0$ 이면 심하게 오염된 상태(severely degraded condition)를 나타낸다.

3. 결 과

저서오염지수(BPI)

2004년 2월의 조사에서 마산만의 BPI는 10-67의 범위를 보였다(Fig. 2). 가장 높은 BPI를 보인 곳은 정점 6으로 67을 보여 정상적인 군집상태에 있음을 나타냈고, 정점 11에서 10으로 가장 낮은 BPI를 보여 극심한 오염상태에 있음을 보였다. 마산만의 21개 정점 중 단 3개의 조사 정점에서만 60이상의 높은 값을 보여 정상적인 군집상태를 나타내었다. 2004년 8월의 조사에서는 종이 출현하지 않았던 정점들을 제외한 나머지 정점들에서 BPI는 5-72의 범위를 보였다. 만 내부에 위치한 정점 1에서도 BPI 값이 5로서 주변의 무생물지역과 유사하게 낮은 BPI를 보였고, 만 입구에 위치한 정점 21에서 BPI 값이 72로 가장 높은 값을 보였다.

BPI를 통해 알아본 마산만의 저서오염도는 겨울철의 경우에도 외해에 위치한 일부 정점들을 제외한 모든 정점에서 다소 오염이 진행된 상태임을 알 수 있었고, 특히 여름철에는 마산만 내만에 위치한 정점들은 심각한 수준의 오염이 진행되어 있음을 알 수 있었다.

Fig. 2. The winter and summer values of benthic pollution index (BPI) in Masan Bay.

Fig. 3. The winter and summer values of AZTI's marine biotic index (AMBI) in Masan Bay.

AZTI's 생물지수(AMBI)

2004년 2월의 조사에서 마산만의 AMBI는 2.2-5.5의 범위를 보였다(Fig. 3). 만 입구의 정점 21에서 가장 낮은 AMBI를 보였고, 정점 11에서 가장 높은 AMBI를 보였다. 2004년 2월의 조사결과에서도 AMBI가 1.2 이하로서 정상적인 군집상태를 보인 정점은 없었고, 대부분의 정점들에서 AMBI가 3.0 이상의 값을 보여 중간정도의 오염상태임을 나타내었다. 2004년 8월의 조사에서는 종이 출현하지 않은 정점들을 제외한 나머지 정점들에서 3.2-5.8의 범위를 보여 마산만 특별관리해역 전체에서 중간 이상의 오

염상태임을 나타내었다.

AMBI로 알아본 마산만의 저서오염 정도를 평가하는 변별력은 겨울철에는 대체로 BPI와 유사한 수준으로 반영하였지만 여름철에는 BPI와는 달리 모든 정점에서 중간 정도 이상의 오염상태를 나타내어 다소 변별력에 차이를 보였다.

생물통합지수(BIBI)

2004년 2월과 8월의 조사결과에 정점 21을 기준으로 하여 각 정점의 생물통합지수(BIBI)를 산출한 결과 2004

Fig. 4. The winter and summer values of benthic index of biotic integrity (BIBI) in Masan Bay.

년 2월에는 1.0-1.7의 범위를 보였고, 2004년 8월에는 1.0-3.0의 범위를 보였다(Fig. 4). 2004년 2월에는 정점 17과 정점 18에서 1.7의 값을 보여 상대적으로 높은 값을 보였으나, 모든 정점이 심각한 수준의 오염현상이 나타나고 있음을 시사하였다. 겨울철에는 만 입구의 정점에서는 상대적으로 높은 저서생물 통합지수를 기대하였으나 그러한 오염구배를 반영하지는 않았다. 2004년 8월에는 BIBI 값이 3.0으로 가장 높은 값을 보였던 정점 19와 2.3의 값을 보인 정점 17을 제외한 나머지 정점들에서 2.0이하의 낮은 값을 보였다. BIBI의 기준으로 보면 정점 21에서는 정상적인 군집상태이나 그 외의 조사정점은 군집상태가 저해된 상태에 있음을 보였다.

4. 토 의

위에서 살펴본 3가지 저서생물지수를 마산만에 적용한 결과 BPI가 hypoxia 현상에 의한 계절적 차이를 가장 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 반면에 AMBI와 BIBI는 정점간 변별력이 낮았으며, 계절간 차이를 잘 반영하지 못하는 것으로 보였다. AMBI는 여름철에 과장된 오염상태를 지시하였고, BIBI는 겨울철에는 더 낮게 평가한 반면에 여름철에는 오히려 더 높은 값을 보여 마산만에서 나타나는 hypoxia 현상을 잘 반영하지 못하는 것으로 보였다. 본 연구에서는 매우 적은 규모의 반폐쇄성 내만을 대상으로 저서생물지수를 구하였기 때문에 여러 가지 관점에서 제한적인 결과를 보였던 것으로 생각된다. 특히 BIBI의 경우 대조구 정점의 수가 부족하였고, 본 연구에서 대조해역으로 선정하였던 정점이 BPI와 AMBI 산출결과 다소 오염된 해역으로 나타나 사용된 metrics의 score 책정에 많은 오류가 포함되어 있었다고 판단된다.

향후 국내에 적용할 경우 전반적인 고려사항과 검토사항을 살펴보면 다음과 같다. 저서생물지수는 저서생물군집의 기능군 구성을 이용하여 유기물오염에 따른 저서생물군집의 천이상태를 지시함으로써 저서생태계의 건강성 정도를 지시하는 하나의 지수값으로 나타내어 관리대상해역의 군집건강상태, 우선관리대상해역의 파악, 복원활동 효과 등을 수치상으로 보여 주고자 하는 의도에서 고안된 지수이다. 이를 위해서는 유기물 유입에 따른 저서생물의 반응과 내성을 반영하는 군집천이에 대한 많은 현장자료가 있어야 저서생물지수가 현실성 있는 지수로 된다. 이러한 자료축적이나 정보가 없는 해역에서는 다른 해역의 기존자료나 이미 자료축적이 되어 있는 외국의 자료를 사용해야 한다. 대형저서생물군집의 경우에는 종조성에 강한 지역성을 보여주기 때문에 해역간에 동일한 종조성을 보이지 않는 경우가 많아서 종 목록자료를 이용하는데 제한을 받게 된다. 따라서 종목록에서 유사한 종을 선별하여

사용함으로써 저서생물군집의 생태학적 자료축적이 없는 해역의 저서생물지수는 현실성 높은 의미를 가지기가 어렵다. 저서생물지수를 사용하기 위해서는 저서생물에 대한 생태기능에 대한 정보가 확보되어 있어야 할 것이며, 이를 위해서는 대상해역 전체에 걸친 광범위한 조사자료가 필요하다. 퇴적물 내 유기물 축적자료와 저서생물간 상호관계를 통하여 각 유기물 농도에서의 출현 밀도를 파악하여 각 저서생물지수에서 규정한 기능군에 각 저서생물종을 할당하는 과정이 요구된다.

국내에서 사용하고 있는 BPI의 경우에 크게 4가지 기능군으로 구분하고 있는데, 섭식생태에 대한 정보가 미흡한 생물군에 있어서는 잠정적인 기능군 분류만이 가능하며(Appendix 1), 향후 해당 생물군에 대한 생태정보가 축적되면 수정 보완되어져야 할 것이다. 특히 해역별 출현종이 달라지기 때문에 수백종에 달하는 종에 대한 섭식생태 정보가 요구되며, 정확한 종동정이 또한 수반되지 않으면 어려운 실정이다. 이를 위해서는 국내 저서생물 전문가들의 네트워크가 형성되어 저서생물에 정보교환이 필요하며, 이를 바탕으로 국내 출현종에 대한 종목록과 생태정보에 대한 데이터베이스가 구축되어져야 할 것이다. 동일한 종에 대해서 BPI와 AMBI의 기능군 분류가 크게 다른 경우가 있는데, 이는 섭식형과 유기물오염 내성이 서로 맞지 않는 경우에 일어난다. 다모류의 대나무갯지렁이(Family Maldanidae)의 경우에는 표층하퇴적물식자로서 BPI에서는 group 3에 할당되지만 AMBI에 의하면 유기물오염에 민감한 종으로 분류되어 group 1로 분류되어 있다(Appendix 1). 이들이 우점한 경우에는 지수값에 큰 영향을 주게 된다. BPI와 AMBI 및 BIBI의 기회종이나 오염지시종으로 분류된 종목록에 있어서도 선정기준이 아직 명확하게 설정된 것이 없어서 전문가 간에도 이견이 있을 수 있는 항목이다.

유럽의 경우 AMBI에 사용되는 저서생물종을 2007년 6월 현재 약 4,100여종의 저서생물을 5개 기능군에 할당한 상태이며, 새로운 종이 출현할 경우 전문가의 의견을 고려하여 기능군에 할당해 오고 있다. 유럽연합에서 2015년까지 양호한 생태계를 유지하기 위한 조치의 하나로써 저서생태계의 복원을 위한 건강성 평가의 잣대로서 제시된 AMBI가 2000년 이후 현재까지 유기물 축적으로 인한 영향과 해사채취, oil 채취, 준설, 양식장 영향 등 다양한 환경교란에 대한 저서생물군집의 영향을 평가하는 등 폭넓게 사용되고 있으며(Muxika *et al.* 2005), 적용에 따른 장단점을 보완하는 단계에 있다.

미국의 경우에도 하구역 및 연안역의 생태계 보전을 위해서 저서생태계의 건강성을 평가하기 위해서 하천생태계의 IBI를 모델로 고안된 저서생물지수인 BIBI에서는 Pearson and Rosenberg(1978)의 퇴적물 유기물 농도증가

에 따른 군집천이 특성에 기반을 두고 있으며, 대상해역에서 출현하는 저서생물을 오염민감종, 오염내성종, 표층서식기회종, 대형균형종 등 생태기능학적 정보에 의거하여 분류하고 있으며, 다양한 서식지에서 출현하는 저서생물을 대상으로 건강, 중간, 오염 상태 등 건강성 평가기준에 사용할 범위를 설정하는 과정을 거치고 있다. 여기서 광범위한 서식지와 공간에 있어서의 현장조사 자료와 생태기능군 분류가 선결과정이다. 적용 대상 해역에 따라서는 평가기준에 대한 범위가 변경될 수도 있을 것이다. 국내에서 처음 사용된 저서오염지수인 BPI의 경우에도 위의 두 저서생물지수와 동일한 과정이 요구되며, 다양한 유기물 오염 구배에 따른 저서생물군집에 대한 현장조사 자료가 있어야 한다. 이후 각 저서생물의 대상으로 섭식생태와 오염 내성 및 생존전략을 기준으로 4개의 기능군으로 분류하는 과정이 요구된다.

저서생물지수의 적용에 있어서 공통으로 나타나는 문제점으로는 저서생물군집의 건강도를 평가하는 기준설정과 관련한 것으로서 지수가 현실성 높은 의미를 가지기 위해서는 다른 환경요인과의 상관관계를 구하여 통계학적인 검정절차를 거쳐야 하는데 위의 지수를 포함한 대부분의 저서생물지수들은 이러한 통계적인 과정을 거치지 않고 경험적으로 기준을 설정하여 사용되어 왔다는 점이다. 초기의 지수들이 한 해역 내에서 정점간 상대적인 비교를 위해서 사용되었기 때문에 일반적으로 광역해역에서 적용할 경우에 요구되는 통계학상의 유의성이나 신뢰구간을 설정하는 과정이 불필요하였던 것과도 연관이 있다고 생각되지만 해역간 비교를 위해서나 시간적인 경과에 따른 지수 비교를 위해서는 통계적인 검정절차가 필요하다. 향후 이러한 문제점을 해결하는 것이 요구된다. 또 다른 문제점은 환경오염이 급속하여 대형저서생물이 서식하지 못하여 출현하지 않는 경우에는 수식에서 최소값으로 계산되거나 임의의 값으로 주어진다(BPI의 경우에는 0의 값으로, BIBI의 경우 1의 값을 부여하고, AMBI의 경우 7.0의 값을 부여함). 그러나 이러한 값을 주는 것은 오염에 의한 것으로 가정하기 때문에 물리적인 교란에 의한 경우에도 오염의 결과로 간주될 수 있어서 지수값의 해석에 주의가 요구된다. 따라서 저서생물지수를 적용하는 과정에는 퇴적상, 유기물함량 등과 지수간에는 상당한 상관관계를 가지고 있기 때문에 저서환경 조건을 고려하여 건강도 평가 기준을 설정해야 할 것을 제안하였다(임 등 2007).

위에서 사용된 3가지 저서생물지수들의 보완점으로 다음과 같다. 저서오염지수는 그 출발점이 Word(1978)의 내서동물의 식성지수(infauna trophic index, ITI)이며, ITI를 개조하여 3개 식성군에 기회종을 하나의 기능군으로 포함시켜서 4개 기능군으로 설정하여 각 기능군의 조성비율을 기초로 지수가 산출된 것이다(최 등 2003; 이 등 2003).

ITI에서는 출현한 저서생물 중에서 숫적으로 주요한 우점종을 위주로 각 기능군에 할당하고 지수식에 대입하여 값을 구하였다. BPI에서는 출현하는 모든 종을 각 기능군에 할당하고 있으며, 소형 육식자에서 표층퇴적물식자, 표층하퇴적물식자 등 다양한 섭식군에 포함되어 있는 기회종을 현장이나 문헌자료에서 선별하고 있다. 따라서 기회종을 4번째 기능군으로 할당하여 구해지는 지수값이 가지는 의미에 대한 생태학적인 설명이 명쾌하지 못한 문제점이 있다. 또한 섭식생태학적인 정보와 오염 내성에 관한 정보가 혼합되어 있다는 점, 퇴적상의 종류에 따라서 섭식군의 우점도가 달라진다는 점 등으로 인하여 언제나 대조구 해역의 저서생물과 상대적인 비교를 통하여 건강도를 평가해야 하는 점들이 광역평가를 제한하는 요인으로 생각된다. 한편 BPI 지수값을 구하기 위해서 표준화된 현장조사 방법의 설정이 요구된다. 즉, 채집시기, 채집정점의 배치와 정점수, 각 정점에서의 최소 채집면적, 정점당 채집횟수 등에 대한 전반적인 조사방법을 결정하는 과정이 시급히 요구된다. 이런 문제는 AMBI나 BIBI에 비해서 미흡한 부분이다.

Azti's 생물지수(AMBI)의 수식에 사용된 각 기능군의 가중치를 구하는 것이 경험식에 의한 것으로 유럽에서는 어느 정도 적합한 수치이나 다른 환경에 놓여 있는 다른 대륙의 연안역에서는 그대로 적용하기에는 미흡한 점이 있다. 아시아나 국내에 적용하기 위해서는 각 기능군의 가중치를 다시 점검할 필요가 있다. 특히 지수값을 근거로 건강성을 평가하는 기준이 될 경우에는 더욱 그러하다. 5개 기능군에 대한 데이터베이스 구축이 유럽이나 북미 대륙을 제외하면 현재로서는 극히 미흡하여 전 지구적으로 적용하기 위해서는 전 지구적인 규모의 자료구축이 요구된다. 최근에 남미대륙의 브라질 연안역에 적용한 결과 저서생물 출현량이 적거나 종수가 빈약한 곳에서는 기존의 군집분석 결과와 잘 일치하지 않았으며, 선형동물이 우점하는 해역에서도 AMBI의 결과가 오염의 구배를 잘 반영해 주지 못하는 것으로 나타났는데(Muniz *et al.* 2005), 이러한 자료축적의 부족에 기인한 것으로 보인다. 최근 AMBI의 적용을 위해서 필요한 최소한의 시료요구량을 추정하였는데, 유럽의 스페인 연안에서는 불과 2개 이상의 그랩(grab) 시료만으로 대상해역의 오염구배를 의미있게 구분할 수 있는 것으로 보고하였다(Muxika *et al.* 2007). 그러나 유럽이나 스페인 해역 외에서도 이러한 결과를 보일지는 의문이며, 해역 고유의 자료를 이용하여 요구 시료량을 결정하는 것이 필요하다.

저서생물통합지수(BIBI)는 미국 동부 대서양 연안의 하구 및 연안역의 저서생물군집의 건강도를 평가하기 위해서 고안된 지수로서 광범위한 해역을 망라할 수 있게 염분과 퇴적상에 따라 7개의 서식지로 구분하고 각 서식지

에서 적절한 metric을 선정하여 지수값을 산정하고 있다. 만일 국내에도 이 통합지수를 적용할 경우에는 저서생물의 내성 여부와 민감 여부를 포함한 출현종의 생태정보에 대한 자료축적이 요구된다. 서식지별 각 metric의 판정값(score)을 결정하기 위해서는 반드시 대조구해역을 선정해야 하며, 정상적인 저서동물군집에서 관심을 두고 있는 교란된 저서동물군집에 이르는 많은 현장 조사 자료에 근거하여 결정해야 하는 과정 즉, 데이터베이스 구축이 요구된다. BIBI에서 요구하는 metric의 하나인 각 생태군의 생물량 자료와 서식지 깊이별 분포 정보가 요구되어 현장조사에서 장비의 보완교체와 각 종별 생물량을 측정해야 하는 실내 분석작업의 양이 크게 증가하는 것이다. 이는 기존 저서생물 채집장비에서 얻을 수 없었던 퇴적물내 수직분포에 대한 자료가 요구되므로 이 부분을 수식에서 제외하거나 향후 수직분포에 대한 정보를 축적해 나가야만 한다는 것을 결정해야 하는 문제에 부딪힌다. 본 연구에서는 마산만의 저서생물에 대한 수직분포자료가 없기 때문에 비교를 위해서 이 metric을 지수산출에서 제외시켜 6개 metric만 사용하여 지수를 구하였다. 국내의 기존 자료를 활용하기 위해서는 당분간은 이러한 적용이 필요하다고 생각되지만 결국에는 수직분포에 대한 정보를 얻을 수 있도록 현장조사 방법이 개선되어야 할 것이다.

국내에서의 저서생물군집 건강도를 평가하기 위해서는 소규모 내만이나 연안역에서는 기존자료로부터 정보축적이 일부 진척된 저서오염지수(BPI)가 적용되는 것이 적합할 것이며, 아울러 기능군이 더 다양하게 세분된 유럽의 AMBI를 병행하는 것이 가능하다고 판단된다. 그러나 다양한 서식지를 포함한 전체 한반도 해역을 대상으로 저서생물건강도를 비교평가하기 위해서는 BPI와 AMBI 자료를 토대로 하여 BIBI를 적용하는 것이 가장 적합할 것으로 판단되어 진다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원의 정책과제인 “연안해역 건강도 평가기술개발을 위한 예비연구(PE97904)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 고병설, 이재학, 홍재상. 1997. 인천연안역 저서동물군집의 시공간적 분포 양상. *한국해양학회지* 「바다」, 2(1), 31-41.
- 이재학, 박자양, 박홍식, 이형근, 김동성. 2003. 저서오염지수(BPI)를 이용한 시화호 환경평가. *Ocean and Polar Res.*, 25, 183-200.
- 임경훈, 신현출, 윤성명, 고철환. 2007. 진해만 대형 저서동물 분석을 통한 저서환경 평가. *한국해양학회지* 「바다」, 12(1), 9-23.
- 임현식, 홍재상. 1997. 진해만 저서동물의 군집생태. 3. 군집구조. *한국수산학회지*, 30(2), 175-187.
- 최진우, 현상민, 장만. 2003. 저서동물에 의한 여름철 광양만의 저서환경 상태파악. *환경생물학회지*, 21, 101-113.
- 최진우, 서진영, 이창훈, 류태권, 성찬경, 한기명, 현상민. 2005. 남해특별관리해역인 마산만에서 동계 및 하계에 출현하는 대형저서동물군집의 공간분포 양상. *Ocean and Polar Res.*, 27, 381-395.
- Bellan-Santini, D. 1980. Relationship between populations of amphipods and pollution. *Mar. Poll. Bull.*, 11, 224-227.
- Berge, J.A. 1990. Macrofauna recolonization of subtidal sediments. Experimental studies on defaunated sediment contaminated with crude oil two Norwegian fjords with unequal eutrophication status. I. Community responses. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 66, 103-115.
- Borja, A., I. Muxika, and J. Franco. 2003. The application of a Marine Biotic Index to different impact source affecting soft-bottom benthic communities along European coasts. *Mar. Poll. Bull.*, 46, 835-845.
- Borja, A., J. Franco, and V. Pérez. 2000. A Marine Biotic Index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar. Poll. Bull.*, 40, 1100-1114.
- Dauer, D.M. 1993. Biological criteria, environmental health and estuarine macrobenthic community structure. *Mar. Poll. Bull.*, 26, 249-257.
- Dauer, D.M. and R.W. Alden. 1995. Long-term trends in the macrobenthos and water quality of the Lower Chesapeake Bay. *Mar. Poll. Bull.*, 30, 840-850.
- Hong, J.S. and J.H. Lee. 1983. Effect of the pollution on the benthic macrofauna in Masan, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 18(2), 169-179.
- Langston, W.J., G.R. Burt, and M.J.A.F. Zhou. 1987. Tin and organotin in water, sediment and biotic organisms of Poole Harbour. *Mar. Poll. Bull.*, 18, 634-639.
- Muniz, P., N. Venturini, A.M.S. Pires-Vanin, L.R. Tommasi, and A. Borja. 2005. Testing the applicability of a marine biotic index (AMBI) to assessing the ecological quality of soft-bottom benthic communities, in the South America Atlantic region. *Mar. Pollut. Bull.*, 50, 624-637.
- Muxika, I., A. Borja, and W. Bonne. 2005. The suitability of the marine biotic index (AMBI) to new impact sources along European coasts. *Ecol. Indic.*, 5, 19-31.
- Muxika, I., L. Ibaibarriaga, J.I. Saiz, and A. Borja. 2007. Minimal sampling requirements for a precise assessment of soft-bottom macrobenthic communities, using AMBI. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 349, 323-333.
- Pearson, T.H. and R. Rosenberg. 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar.*

Biol. Ann. Rev., 16, 229-311.

- Rafaelli, D.G. and C.F. Mason. 1981. Pollution monitoring with meiofauna using the ratio of nematodes to copepods. *Mar. Poll. Bull.*, 12, 158-163.
- Reish, D.J. and T.V. Gerlinger. 1984. The effects of cadmium, lead and zinc on survival and reproduction in the polychaetous annelid *Neanthes arenaceodentata* (F. Nereidae). *Proc. First Int. Polychaete Conf.*, 383-389.
- Van Dolah, R.F., J.L. Hyland, A.F. Holland, J.S. Roesn, and T.R. Snoots. 1999. A benthic index of biological integrity for assessing habitat quality in estuaries of the southeastern USA. *Mar. Environ. Res.*, 48, 269-283.
- Warwick, R.M. 1986. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Mar. Biol.*, 92, 557-562.
- Weisberg, S.B., J.A. Ranasinghe, D.M. Dauer, L.C. Schaffner, R.J. Diaz, and J.B. Frithsen. 1997. An estuarine benthic index of biotic integrity (B-IBI) for the Chesapeake Bay. *Estuaries*, 20, 149-158.
- Wollenweider, R.A., F. Giovanardi, G. Montanari, and A. Rinaldi. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: Proposal for a trophic scale, turbidity and generalised water quality index. *Environmetrics*, 9, 329-357.
- Word, J.Q. 1978. The infaunal trophic index, in southern California Coastal Water Researcher project Annual Report. El Segundo, CA. p. 19-39.

Received Nov. 1, 2007

Accepted Dec. 22, 2007

Appendix 1. The faunal list of each functional group.

Species	Taxa	BPI group	AMBI group	Feeding type
<i>Anaitides koreana</i>	P	1	2	C
<i>Anomura</i> sp.	C	1	1	C
<i>Arcidae</i> sp.	M	1	2	FF
<i>Asterina pectinifera</i>	E	1	2	C
<i>Atrina pectinata</i>	M	1	2	FF
<i>Brachyura</i> sp.	C	1	1	C
<i>Chone</i> sp.	P	1	2	FF
<i>Ciona intestinalis</i>	Ch	1	2	FF
<i>Cnidaria</i> sp.	Cn	1	2	C
<i>Diopatra sugokai</i>	P	1	2	C
<i>Dosinorbis japonicus</i>	M	1	1	FF
<i>Drilonereis</i> sp.	P	1	2	C
<i>Echinodermata</i> sp.	E	1	2	C
<i>Euchone analis</i>	P	1	1	FF
<i>Eumida sanguinea</i>	P	1	2	C

Appendix 1. Continued.

Species	Taxa	BPI group	AMBI group	Feeding type
<i>Eunice antennata</i>	P	1	1	C
<i>Fasciolaridae</i> sp.	M	1	2	C
<i>Glycera chirori</i>	P	1	2	C
<i>Glycinde</i> sp.	P	1	2	C
<i>Goniada maculata</i>	P	1	2	C
<i>Harmothoe</i> sp.	P	1	2	C
<i>Hydroides ezoensis</i>	P	1	2	FF
<i>Lapidasthenia</i> sp.	P	1	2	C
<i>Lepidonotus</i> sp.	P	1	2	C
<i>Lucinidae</i> sp.	M	1	1	FF
<i>Lumbrineris japonica</i>	P	1	2	C
<i>Lumbrineris latreilli</i>	P	1	2	C
<i>Micropodarko</i> sp.	P	1	4	C
<i>Musculus senhausia</i>	M	1	2	FF
<i>Mytilus</i> sp.	M	1	2	FF
<i>Nassariidae</i> sp.	M	1	2	H
<i>Nemertinea</i>	N	1	2	C
<i>Nereidae</i> unid.	P	1	2	C
<i>Nereis longior</i>	P	1	2	C
<i>Paphia undulata</i>	M	1	1	FF
<i>Perolepis</i> sp.	P	1	2	C
<i>Pherusa plumosa</i>	P	1	2	SDF
<i>Ruditapes philippinarum</i>	M	1	2	FF
<i>Sabellidae</i> unid.	P	1	2	FF
<i>Saxidomus</i> sp.	M	1	2	FF
<i>Sigambra tentaculata</i>	P	1	4	C
<i>Styela clava</i>	Ch	1	2	FF
<i>Syllidae</i> unid.	P	1	2	C
<i>Tambalagamia fauveli</i>	P	1	2	C
<i>Thalenessa digitata</i>	P	1	2	C
<i>Turbellaria</i>	O	1	2	C
<i>Amaeana</i> sp.	P	2	3	SDF
<i>Ampharete arctica</i>	P	2	1	SDF
<i>Amphicteis gunneri</i>	P	2	3	SDF
<i>Amphioplus tricoides</i>	E	2	2	SDF
<i>Amphipoda</i> sp.	C	2	1	SDF
<i>Amphisamytha japonica</i>	P	2	3	SDF
<i>Brada villosa</i>	P	2	1	SDF
<i>Chaetozone setosa</i>	P	2	4	SDF
<i>Chitonidae</i> sp.	M	2	3	H
<i>Cirriiformia tentaculata</i>	P	2	4	SDF
<i>Cumacea</i>	C	2	3	SDF
<i>Isopoda</i>	C	2	1	SDF
<i>Laonice cirrata</i>	P	2	3	SDF
<i>Loimia medusa</i>	P	2	3	SDF
<i>Magelona japonica</i>	P	2	3	SDF
<i>Melinna cristata</i>	P	2	3	SDF
<i>Nectoneanthes latipoda</i>	P	2	3	SDF
<i>Nephtys oligobranchia</i>	P	2	3	SDF

Appendix 1. Continued.

Species	Taxa	BPI group	AMBI group	Feeding type
<i>Pista cristata</i>	P	2	3	SDF
<i>Poecilochaetus johnsoni</i>	P	2	1	SDF
<i>Prionospio cirrifera</i>	P	2	4	SDF
<i>Prionospio steenstrupi</i>	P	2	4	SDF
<i>Spiophanes bombyx</i>	P	2	3	SDF
<i>Tellinidae</i> sp.	M	2	3	SDF
<i>Terebellides horikoshii</i>	P	2	3	SDF
<i>Tharyx</i> sp.	P	2	4	SDF
<i>Thelepus</i> sp.	P	2	3	SDF
<i>Trochochaetus</i> sp.	P	2	3	SDF
<i>Yoldia amygdalea</i>	M	2	3	SDF
<i>Yoldiidae</i> sp.	M	2	3	SDF
<i>Aricidea pacifica</i>	P	3	4	SSDF
<i>Heteromastus filiformis</i>	P	3	4	SSDF
<i>Lagis bocki</i>	P	3	1	SSDF
<i>Lumbrineris longifolia</i>	P	3	4	SSDF
<i>Maldane cristata</i>	P	3	1	SSDF
<i>Notomastus</i> sp.	P	3	4	SSDF
<i>Ophelina acuminata</i>	P	3	4	SSDF
<i>Phylo felix asiaticus</i>	P	3	2	SSDF
<i>Praxillella affinis</i>	P	3	1	SSDF
<i>Protankyra bidentata</i>	E	3	3	SSDF
Sipunculidea	S	3	3	SSDF
<i>Sternaspis scutata</i>	P	3	4	SSDF
<i>Capitella capitata</i>	P	4	5	SSDF
<i>Ciratulus</i> sp.	P	4	5	SDF
<i>Dorvillea</i> sp.	P	4	5	C
<i>Macoma</i> sp.	M	4	5	SDF
<i>Paraprionospio pinnata</i>	P	4	5	SDF
<i>Polydora ligni</i>	P	4	5	SDF
<i>Pseudopolydora</i> sp.	P	4	5	SDF
<i>Scolecopsis</i> sp.	P	4	5	SDF
<i>Spiochaetopterus</i> sp.	P	4	5	FF
<i>Theora fragilis</i>	M	4	5	SDF

Taxa (Cn: Cnidaria, N: Nemertinea, S: Sipuncula, M: Mollusca, P: Polychaeta, C: Crustacea, E: Echinodermata, Ch: Chordata, O: Others), feeding type (C: carnivores, FF: filter feeders, SDF: surface deposit feeders, SSDF: subsurface deposit feeders).

Appendix 2. The faunal list of the pollution-indicative and pollution-sensitive taxa used in the Masan Bay BIBI.

	Pollution-indicate taxa	BPI group	Pollution-sensitive taxa	AMBI group
	<i>Capitella capitata</i>	4	<i>Ampharete arctica</i>	1
	<i>Ciratulus</i> sp.	4	<i>Brada villosa</i>	1
	<i>Dorvillea</i> sp.	4	<i>Dosinorbis japonicus</i>	1
	<i>Macoma</i> sp.	4	<i>Euchone analis</i>	1
	<i>Paraprionospio pinnata</i>	4	<i>Eunice antennata</i>	1
Species	<i>Polydora ligni</i>	4	<i>Lagis bocki</i>	1
	<i>Pseudopolydora</i> sp.	4	<i>Lucinidae</i> sp.	1
	<i>Scolecopsis</i> sp.	4	<i>Maldane cristata</i>	1
	<i>Spiochaetopterus</i> sp.	4	<i>Paphia undulata</i>	1
	<i>Theora fragilis</i>	4	<i>Poecilochaetus johnsoni</i>	1
			<i>Praxillella affinis</i>	1