

Research Paper

해양환경 평가지수를 활용한 환경영향평가서 및 사후환경영향조사결과 통보서 개선 방안 연구

이어진 · 김태윤

한국환경정책·평가연구원

Improvement of the Environmental Impact Assessment and Post-environment Impact Survey Reports Using Marine Environment Assessment Indices

Eojin Lee · Taeyun Kim

Korea Environment Institute

요약: 본 연구에서는 해양에서 진행되는 개발사업으로 인하여 해양환경에 미치는 영향을 효율적으로 판단할 수 있는 평가지수들을 비교·검토하였다. 해양수질 분야에는 수질평가지수(WQI), 해양저질 분야에는 유해화학물질 정화지수(CIHC), 부영양화 정화지수(CIET), 농축계수(EF), 해양저서생물 분야에는 저서건강도지수(BHI), 저서오염지수(BPI)를 선정하였다. 개발사업에서 관측된 자료를 각각의 평가지수에 적용하여 평가지수의 특성 및 효용성을 파악하였다. 수질평가지수, 유해화학물질 정화지수, 저서건강도지수가 평가방법 및 평가기준이 명확히 정의되어 있으며, 통합적인 환경영향 분석이 가능하였다. 동 연구에서 제시된 지수이외에도 해양환경을 평가하는 다양한 지수가 있으며, 사업별 특성에 따라 적합한 지수를 활용하는 것도 중요하다.

주요어: 해양환경, 평가지수, 환경영향평가, 사후환경영향

Abstract: In this study, we used marine environment assessment indices to evaluate impacts of various development projects on the marine environment. The Water Quality Index (WQI) was applied in the field of marine water quality and the Cleanup Index of Harmful Chemicals (CIHC), the Cleanup Index of Eutrophication (CIET), the Enrichment Factor (EF) were used in the field of marine sediment. In the field of marine benthic organisms, the Benthic Health Index (BHI) and the Benthic Pollution Index (BPI) were utilized. Each assessment index was calculated using the data observed in the development project, and its characteristics and usefulness were evaluated. The assessment method and criteria were clearly defined for WQI, CIHC, and BHI. Furthermore, through these indices, an integrated environment impact analysis was possible. Apart from the indices presented in this study, there are various indices that can be used for evaluating the marine environment. Therefore, it is important to utilize appropriate indices according to the characteristics of each project.

Keywords: Marine Environment, Assessment Index, Environment Impact Assessment, Post-environment Impact

I. 서론

환경영향평가는 개발사업에 의한 부정적인 환경적 영향을 사전에 예측하고 저감하기 위한 것으로 우리나라는 1981년 환경청 고시에 따라 「환경영향평가서 작성에 관한 규정」이 제정되면서 실질적인 제도운영이 시작되었다. 그리고 2011년 7월에 각기 다른 법률에 근거하여 시행되어 온 환경영향평가를 「환경영향평가법」으로 통합하고 사후환경영향조사결과 통보서의 검토 기관을 규정하여 사후관리를 강화하였다(Choi & Park 2015; Choi et al. 2019). 환경영향평가제도는 나라별로 상이하며, 중요한 차이를 보이는 것이 평가 주체이다. 우리나라, 일본, 네덜란드는 사업시행자가 평가에 대한 책임을 지는 반면에 미국과 캐나다는 연방 정부가 책임을 가진다(Lee et al. 2018). 그로 인해 우리나라에서는 환경영향평가서 작성에 대한 공정성 시비가 지속적으로 발생하고 있다. 특히 사업시행자는 직접 평가서를 작성하여야 하기 때문에 환경영향평가업자를 활용하게 되며, 이 과정에서 대행비용이 저렴한 환경영향평가업자와 계약하거나 견적을 통하여 저렴한 가격을 환경영향평가업자에게 강요하는 문제가 발생한다. 또한 사업자에게 유리한 방향으로 진행되기 위하여 과학적 신뢰가 결여된 부실한 평가서 작성이 발생할 수 있다(Yoo et al. 2017; Choi 2018; Lee et al. 2018).

사업시행자는 「환경영향평가법」에 의거하여 사업시행으로 인한 환경적 영향을 파악하기 위해 사후환경영향조사를 수행하고 있다. 사후환경영향조사의 주요 목적은 첫째, 사업자가 협의된 사업을 착공한 후에 그 사업이 주변 환경에 미치는 영향을 조사하고 그 결과를 통보하는 것이다. 둘째, 환경영향조사 결과를 비교·분석·평가하여 환경에 미치는 영향을 검토하고 필요시 공사 중지, 원상복구, 그 밖의 필요한 조치를 시행하는 것이다. 하지만 다수의 사후환경영향조사는 협의내용으로 제시된 사후환경영향조사계획을 이행하고 있음을 알려주는 데 초점을 맞추고 있으며, 환경영향조사 결과의 비교·분석·평가의 내용은 미흡하다(NLIC 2021).

사후환경영향조사결과 통보서에 대한 작성 가이드라인에는 항목별 고려사항을 제시하고 있으나 그 내용이 구체적이지 않다. 예를 들어, 해양환경 분야에서는 첫째, 해양수질의 경우에는 직접 영향권과 간접 영향권을 구분하여 비교·분석한다. 둘째, 해양매립 사업의 경우에는 해수유통 및 퇴적변화로 인한 영향을 확인할 수 있도록 조사를 실시하여 결과를 제시한다. 셋째, 해양 동·식물상의 경우는 지점별, 연도별 변화를 확인할 수 있도록 제시한다. 이와 같이 해양환경적 이슈는 언급되어 있으면서도 영향 정도 및 변화 추이를 확인할 수 있는 방안에 대한 내용은 명확하지 않다(MOE 2015).

해외에서는 해양환경을 효과적으로 파악하기 위하여 지수를 활용하고 있으며, 분야별로 다양한 지수를 이용하고 있다. 해양수질 평가를 위하여 유기오염지수(organic pollution index), 부영양화지수(eutrophication index), 수질오염지수(water pollution index)를 사용하고 있다(Liu et al. 2011; Tanjung et al. 2019). 해양저질 평가에서는 오염유입지수(pollution load index), 농집지수(geoaccumulation index), 잠재생태위험지수(potential ecological risk index)를 활용하며, 해양대형저서생물의 건강상태 및 생태학적 현황을 파악하기 위해 AZTI marine biotic index(AMBI)와 M-AMBI를 적용하고 있다(Wardiatno et al. 2017; Tian et al. 2020).

따라서 본 연구에서는 해양분야에 중요한 사업을 대상으로 실효성 있는 환경영향평가서와 사후환경영향조사결과 통보서를 작성할 수 있도록 효과적인 지수 적용 방안을 제안하고자 한다. 해양수질 분야에는 수질평가지수(Water Quality Index, WQI), 해양저질 분야에는 유해화학물질 정화지수(Cleanup Index of Harmful Chemicals, CIHC), 부영양화 정화지수(Cleanup Index of Eutrophication, CIET), 농축계수(Enrichment Factor, EF), 해양저서생물 분야에는 저서건강도지수(Benthic Health Index, BHI), 저서오염지수(Benthic Pollution Index, BPI)를 활용할 예정이며, 환경적 변화추이를 명확히 확인할 수 있도록 적용 범위 및 한계점을 제시하고자 한다.

II. 연구방법론

1. 수질평가지수(WQI)

WQI는 해역의 수질을 평가하는데 이용되는 기준으로 용존무기질소, 용존무기인, 일차반응항목인 식물플랑크톤 농도와 투명도 그리고 이차반응항목인 저층산소포화도의 5개 항목에 가중치를 고려하여 산정한다.

$$WQI = \frac{10 \times DO + 6 \times (Chl-a + SD)}{2 + 4 \times (DIN + DIP)} / 2 \quad (1)$$

여기서, DO는 저층산소포화도, Chl-a는 식물플랑크톤 농도, SD는 투명도, DIN은 용존무기질소, DIP는 용존무기인이다.

WQI를 통해 산정된 값을 활용하여 수질 등급을 매우 좋음(I)등급에서 아주 나쁨(V)등급까지 5단계로 구분한다(Table 1). 그리고 WQI는 해역별로 기준값이

Table 1. Evaluation grade and criteria of Water Quality Index (WQI)

Grade	Criteria
I (Very Good)	≤ 23
II (Good)	24~33
III (Normal)	34~46
IV (Bad)	47~59
V (Very Bad)	≥ 60

상이하며, 동해와 제주해역이 상대적으로 낮은 기준 값을 보인다(MOF 2018a). WQI에 대한 연구는 다양한 해역에 적용되었으며, 해역의 수질 현황을 제시하고 이를 통하여 수질개선에 필요한 대책들을 제안하고 있다(Ra et al. 2013; Kong et al. 2016; Seo et al. 2019).

2. 유해화학물질 정화지수(CIHC)

유해화학물질에 의한 해양퇴적물의 오염도를 조사하여 정화·복원 구역을 설정하기 위해 CIHC를 이용하고 있다(MOF 2018b). KOEM(2021)은 부산감천항, 통영항, 여수구항 등에 오염퇴적물 정화작업을 수행하고 있으며, CIHC를 활용하여 사업의 효과도 판단하고 있다. 평가대상인 유해화학물질은 10개의 공통 항목과 4개의 선택 항목으로 구분되며 기준 1 이하의 농도범위를 가진 항목은 평가 점수를 0으로 설정하고, 기준 1 이상이면서 기준 2 미만의 농도에서는 농도값에 따라 점수를 차등으로 부여한다. 그리고 기준 2 이상을 초과하는 항목에 대해서는 분석치에 기준 2의 농도를 나눈 값으로 점수를 산정한다(Table 2). 평가항목별로 산출된 평가점수를 합산한 값이 CIHC가 된다.

유해화학물질 영향에 따른 정화·복원 범위는 CIHC가 2이상인 구역으로 설정하고 있다. 하지만 항만구

Table 2. Evaluation items and criteria of Cleanup Index of Harmful Chemicals (CIHC)

Items	Unit	Criteria 1	Criteria 2	Option	Score
As	ppm (dry weight)	9.0	41.6	Common	0: less than criteria 1 [{measured value/ criteria 1} / {criteria 1 - criteria 2}] : between criteria 1 and criteria 2
Cd	"	0.68	4.21	"	
Cr	"	80	370	"	
Cu	"	24	108	"	
Hg	"	0.15	1.0	"	
Ni	"	23	52	"	
Pb	"	50	220	"	
Zn	"	200	410	"	
PCBs	ppb (dry weight)	21.6	189	"	1: equal to criteria 2 [measured value/ criteria 2] : criteria 2 or over
PAHs	"	4,000	45,000	"	
Chlordane	"	0.5	6.0	Selection	
Dieldrin	"	0.02	8.0	"	
DDT	"	1.6	46	"	
TBT	"	5.0	105	"	

Table 3. Evaluation items and criteria of Cleanup Index of Eutrophication (CIET)

Items	Unit	Criteria	Grade
Ignition of Loss (IL)	% (dry weight)	< 5	0
		5~15	3
		≥ 15	6
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/g (dry weight)	< 13	0
		13~20	1
		20~30	2
		30~40	4
		≥ 40	6
Acid Volatile Sulfide (AVS)	mg/g (dry weight)	< 0.6	0
		0.6~1	1
		1~5	2
		5~10	4
		≥ 10	6

역 중 수상구역과 어항구역의 수역은 CIHC가 4이상 인 구역을 정화·복원 범위로 설정할 수 있다.

3. 부영양화 정화지수(CIET)

CIHC와 더불어 해양오염퇴적물의 오염정도를 판단할 수 있는 지수는 CIET이다. 부영양화 정화지수는 강열감량, 화학적산소요구량, 산취발성황화물의 농도를 이용하여 산정한다(MOF 2018b). 평가에 이용되는 항목이 적고 농도값에 대하여 평가점수가 정해져 있기 때문에 간단히 산출될 수 있다. 산출된 평가점수를 합산하여 CIET가 6 이상이 되면 해당 구역을 부영양화 관련 정화·복원의 범위로 정한다(Table 3).

4. 농축계수(EF)

국가산업단지 및 농공단지, 소규모 공장 등과 같은 산업시설이 연안지역에 조성되고 간척과 매립, 방파제 및 방조제와 같은 연안 개발이 지속되면서 중금속에 대한 오염도가 가중되고 있다(Woo et al. 2019). 퇴적물의 중금속 오염도를 평가하는 지수로 EF가 사용되고 있다(Chen et al. 2007; Lim et al. 2007; Hwang & Kim 2011; Park et al. 2013).

$$EF = (M_s / A_s) / (M_c / A_c) \quad (2)$$

여기서, M_s 는 퇴적물 중의 대상 원소의 함량, A_s 퇴적물 중의 알루미늄(Al)의 함량, M_c 는 지각 중의 대상 원소의 함량, A_c 지각 중의 알루미늄(Al)의 함량

Table 4. Evaluation grade and criteria of Enrichment Factor (EF)

Grade	Criteria
I (No enrichment)	< 1
II (Minor enrichment)	1~3
III (Moderate enrichment)	3~5
IV (Moderately severe enrichment)	5~10
V (Severe enrichment)	10~25
VI (Very severe enrichment)	25~50
VII (Extremely severe enrichment)	> 50

이다. 아래첨자 s와 c는 연구지역과 전세계 지각의 평균값을 의미하며, 보존성 원소인 Al 을 기준원소로 하여 EF를 산정할 수 있다. 그리고 보존성 원소인 Al 을 대신하여 Fe, Li, Sc, Cs, Co 등도 사용될 수 있다.

EF를 통하여 해당 지역이 자연 상태와 비교하여 얼마만큼 인위적인 영향을 받았는지 평가할 수 있으며, 오염도를 7등급으로 구분하여 나타낼 수 있다(Table 4).

5. 저서건강도지수(BHI)

조해대 저서동물의 조사결과를 바탕으로 저서생태계의 건강도를 평가하는 BHI가 있다.

$$BHI = 25 \times [(4 \times N_1 + 2.68 \times N_2 + 1.36 \times N_3 + 0.04 \times N_4) / N_{total}] \quad (3)$$

여기서, N 은 각각 그룹의 개체수이며 저서생물이 출현하지 않을 시 0의 값을 부여한다. 그룹 1은 낮은 유기물농도에서 높은 밀도로 출현 또는 출현빈도와 밀

도가 낮은 종, 그룹 2 : 유기물 농도와 상관없이 고른 분포를 하는 종, 그룹 3은 비교적 높은 유기물농도에 서 높은 밀도로 출현하는 종, 그룹 4는 계절적으로 무 생물역이 발생하는 해역에서 높은 밀도로 출현하거 나 높은 유기물 농도에서 출현하는 종이다.

BHI를 이용하여 어장환경을 평가하며, 총유기탄소 량 점수를 함께 고려하여 어장환경을 1등급부터 4등 급까지 4단계로 구분하여 관리하고 있다(NIFS 2020). NIFS(2021)는 어장환경평가 결과를 토대로 어업면 허 유효기간을 정하고 어장환경 개선 및 어장위치 조 정 등의 조치를 취하고 있다. BHI는 저서동물을 네 개 의 그룹으로 분류하고 구체적인 종 목록이 제시되어 있다. 목록에 표시되지 않은 종이 출현할 경우에는 같 은 속(Genus)명에 속하는 종들 중 낮은 그룹으로 정 하며, 동일 속명도 없을 시에는 그룹 1로 분류한다. BHI는 점수가 높을수록 저서생태계가 양호함을 나타 내며, 어장환경을 평가하는 기준은 25점 이하, 26~ 50점, 51~70점, 71점 이상으로 구분하고 있다. Han et al.(2020)은 BHI를 해역 및 사업별로 구분하여 수치를 분석하였으며, 서해역 22.4±9.4, 남해역 27.4±9.4, 동해역 22.2±8.3의 결과를 제시하였다. 사업별 분석결과는 폐기물 처리시설과 산업단지 조성 사업 인근 지역에서 높은 BHI를 나타내었다.

6. 저서오염지수(BPI)

환경적 오염 현황을 파악하기 위해서는 생물체를 대상으로 평가를 수행하여 환경적 변화 양상을 파악 할 수 있다. 해양에서도 저서환경에서 생활하는 생물 체를 대상으로 서식환경의 오염도를 확인할 수 있다. 저서생물의 군집변화를 토대로 저서생태계의 오염실 태를 파악할 수 있는 BPI가 활용되고 있으며, 다양한 연구를 통하여 적용 타당성과 효율성이 검증되었다. BPI를 산정하기 위해서 저서동물을 4개군으로 구분 하며, 제 1군은 대형 육식자와 여과식자, 제 2군은 표 층퇴적물 식자, 제 3군은 내서퇴적물식자, 제 4군은 오염지시종이다(Lee et al, 2003; Choi & Seo 2007; Kim et al, 2014; Seo 2016).

$$BPI = [1 - \frac{(a \times N_1 + b \times N_2 + c \times N_3 + d \times N_4)}{(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) / d}] \times 100 \quad (4)$$

여기서, N₁, N₂, N₃, N₄는 제 1군, 제 2군, 제 3군, 제 4군

Table 5. Evaluation grade and criteria of Benthic Pollution Index (BPI)

Grade	Criteria
I (Normal)	≥ 60
II (Slightly polluted)	41~60
III (Moderately polluted)	31~40
IV (Highly polluted)	21~40
V (Very highly polluted)	≤ 20

개체수이며, 각 군별 출현개체수에 부과되는 가중치 는 a=0, b=1, c=2, d=3 이다.

BPI에서는 오염정도를 평가하기 위하여 5단계로 구분하고 있으며, Lee et al. (2003)의 연구에서 단계 의 범위를 1등급 61-100, 2등급 50-60, 3등급 40- 50, 4등급 30-40, 5등급 0-30으로 정하고 있다. 하 지만 타 연구에서는 5단계로 구분은 하였지만 그 범 위를 달리하기도 하였다. Choi & Seo(2007)는 보통 (≥60), 약간오염(41-60), 중간오염(31-40), 심한오 염(21-30), 아주 심한오염(≤20)으로 정하여 오염도 를 평가하였다(Table 5).

III. 평가지수의 적용사례

1. 해양수질 분야

WQI를 활용하여 해역의 수질 현황 및 시간적 변화 를 검토하였다. 환경영향평가정보지원시스템(ELASS) 에 등록된 사후환경영향조사결과 통보서 중에 WQI 관련항목이 조사된 사업을 선정하여 분석하였다. 사 용된 통보서는 환경영향평가서 작성을 위하여 2014 년과 2015년에 해양환경조사를 수행하였으며, 환경 영향평가 협의 후 공사를 시행하여 현재는 운영 중으 로 2018년부터 사후환경영향조사를 진행하고 있다. WQI의 변화를 보면 2019년 8월에 매우나쁨(V) 등 급이 산정되었다. WQI가 매우 나쁨일 때에는 저층의 DO, Chl-a, 투명도가 좋지 못하여 수질 악화가 발 생한 것으로 판단된다. 그러나 6개월 이후인 2020년 2월에는 Chl-a 항목을 제외한 저층DO, 투명도가 개 선되어 WQI가 좋음(II)등급으로 향상되었다. WQI가 급변하는 시기인 2019년 5월부터 2020년 2월까지 는 이미 공사가 완료되어 운영 중인 기간으로 공사로 인

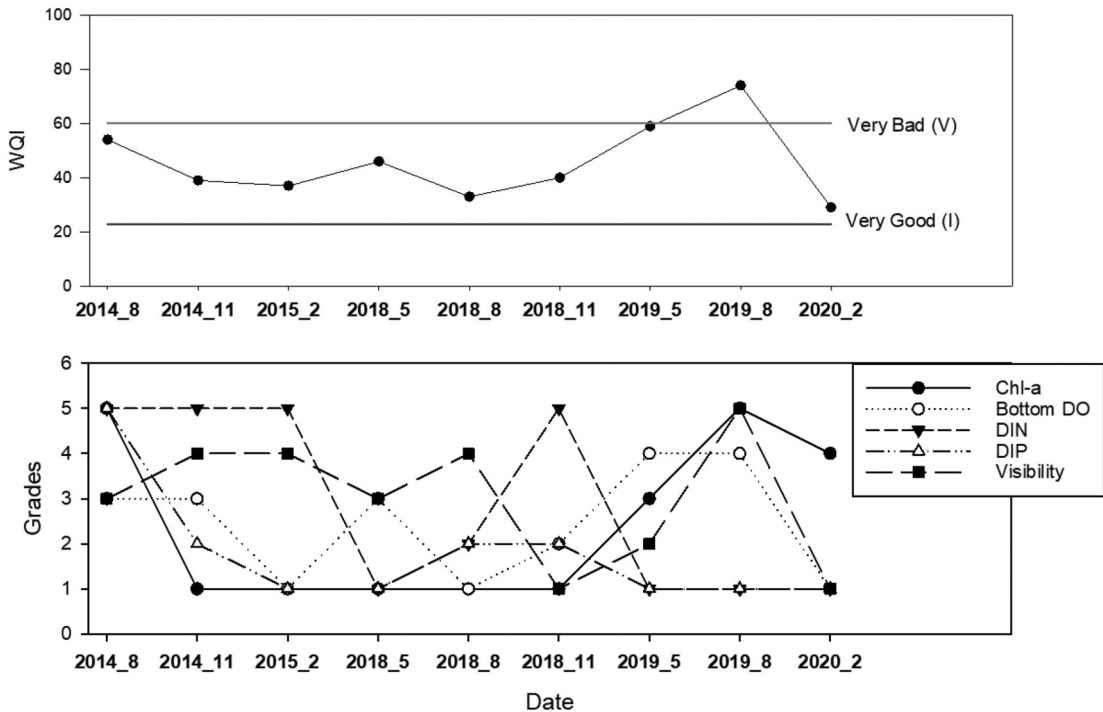


Figure 1. Evaluation Items and variations of Water Quality Index (WQI) (very good(I): ≤ 23 , good(II): 24~33, normal (III): 34~46, bad (IV): 47~59, very bad (V): ≥ 60).

한 영향으로는 볼 수 없다. 따라서 주변 해역의 국가 측정망에서 관측된 자료와 비교·분석하여 추가적인 원인 파악이 요구된다. 2019년 이전에는 WQI가 상대적으로 유사하게 나타났지만, 투명도의 경우에는 1등급부터 4등급까지 변화 폭이 크게 발생하였다(Figure 1). 이와 같은 투명도의 변화는 조사시점의 해황(파고 포함)과 연관성이 있으므로 해황과 함께 분석하는 것이 필요하다.

2. 해양저질 분야

해양저질평가를 수행하기 위하여 우선적으로 CIHC를 활용하였다. 관련 자료는 EIASS 시스템에 등록된 준설사업으로부터 추출하였다. CIHC는 10개의 유해화학물질 농도를 토대로 산정되었으며 준설지점, 준설구역과 인접한 지점, 대조군 지점으로 구분하여 분석하였다. 조사 해역은 As, Cd, Ni을 제외한 유해화학물질 항목의 농도가 기준 1보다 낮았으며, CIHC 범위도 0.41~0.61로 조사기간 동안 유해화학물질로 인한 환경적인 영향은 크지 않았다. 준설지점보다는

준설과 인접한 지점에서 약간 높은 CIHC 값을 보이고 있었다. 하지만 대조군 지점과 준설 지점에서는 유사한 CIHC 값을 나타내고 있었다(Figure 2). 향후 지속적인 조사 및 CIHC 산정을 통하여 준설 지역과 대조군 지역의 변화를 검토하고 이를 통하여 준설로 인한 영향을 파악할 수 있을 것이다. 또한 준설 지역과 인접 지역을 비교함으로써 준설이 주변 지역에 미치는 영향을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

CIHC와 더불어 CIET를 산정하기 위하여 동일 준설사업의 자료를 활용하였다. 13개의 조사지점에서 관측된 강열감량, 화학적산소요구량, 산취발성황화물 자료를 분석하였으며 산취발성황화물의 경우에는 모든 지점에서 최소기준 농도 이하로 측정되어 평가점수가 0점으로 부여되었다. 조사 해역에서의 강열감량의 범위는 5~15%(건중량)을 보이고 있어 평가점수가 동일하게 3점으로 부여되었으며, 조사지점에 따라 COD 농도가 상이하여 CIET의 점수는 COD 농도에 따라 변동함을 알 수 있었다. 조사지점 6에서는 CIET의 점수가 제일 높았으며 오염이 가중될 경우,

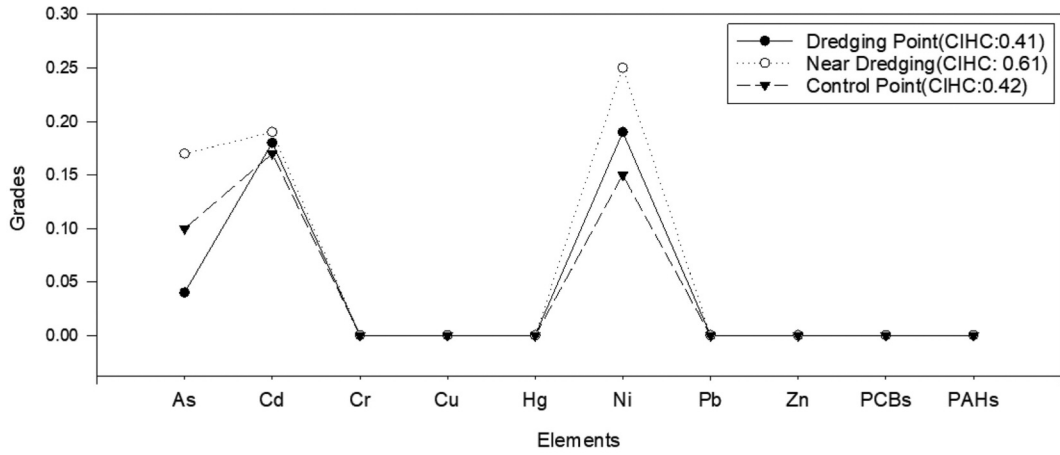


Figure 2. Variations of Cleanup Index of Harmful Chemicals (CIHC)-related evaluation items. Restoration is required when CIHC is over 2.

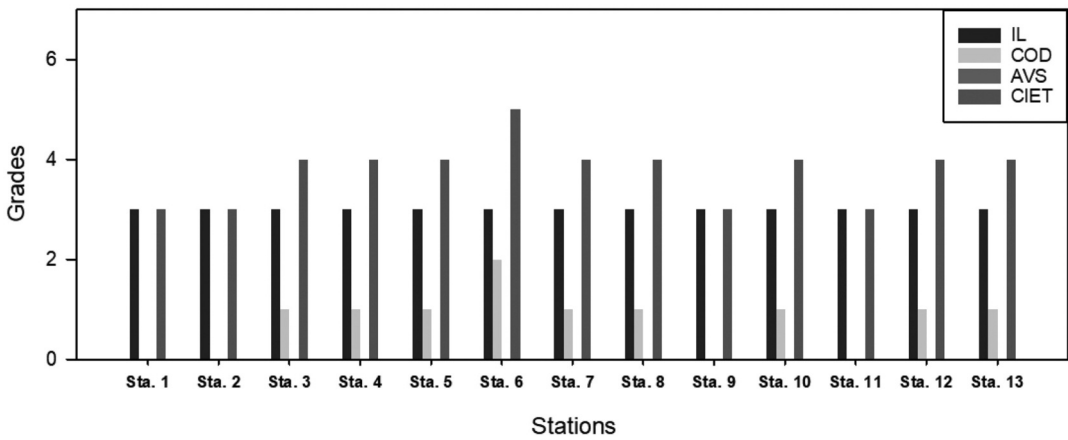


Figure 3. Variations of Cleanup Index of Eutrophication (CIET)-related evaluation items. Restoration is required when CIET is over 6.

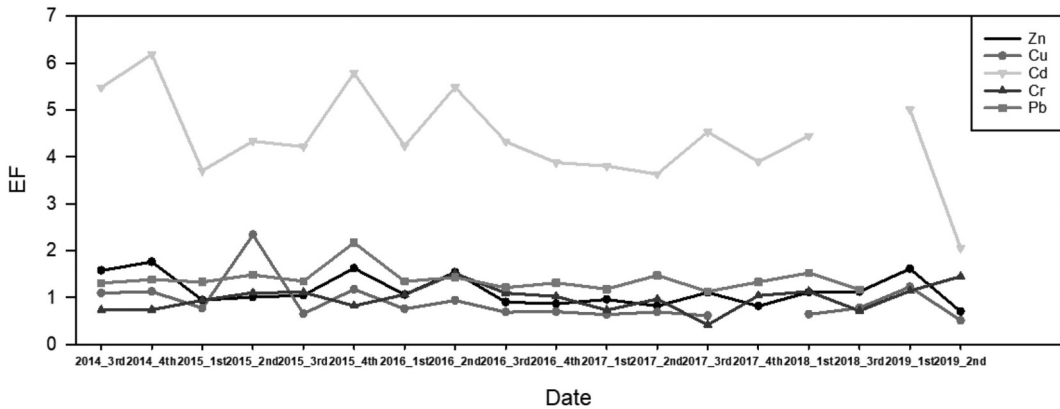


Figure 4. Enrichment Factor (EF) variations of Zn, Cu, Cd, Cr, and Pb (no enrichment: < 1, enrichment: 1~3, moderate enrichment: 3~5, moderately severe enrichment: 5~10, severe enrichment: 10~25, very severe enrichment: 25~50, extremely severe enrichment: > 50).

부영양화 관련 정화·복원이 필요한 구역으로 포함될 수 있다(Figure 3).

정화지수 이외에 해양저질을 평가할 수 있는 EF를 적용하여 해양저질환경의 변화를 고찰하였다. 2014년부터 2019년까지 관측된 분기별 해저 중금속 자료를 활용하였으며 대상항목은 Zn, Cu, Cd, Cr, Pb으로 정하였다. EF의 등급 범위에 따르면 Cd를 제외한 모든 항목이 I등급(농축되지 않음) 또는 II등급(적은 농축)으로 평가되었으며, Cd의 경우에는 III등급(보통 농축)과 IV등급(보통보다 심한 농축)의 범위에서 변동하였다. 해당 조사해역에서는 Cd에 대한 지속적인 모니터링이 요구되며, 2019년 2분기에 측정된 Cd의 농도가 II등급으로 낮아져 해양저질 환경 측면에서 긍정적인 신호로 판단된다(Figure 4).

3. 해양저서생물 분야

해양저서생물을 평가하기 위해 EIASS 시스템에 등록된 준설토 투기장 사업을 대상으로 BHI를 산정하였다. 준설토 투기장 인근의 8정점에 대하여 2015년부터 2020년까지 분기별로 수행된 저서생물 조사자료를 활용하였다. BHI는 71 이상이면 우수한 건강도, 25 이하이면 불량한 건강도를 나타낸다. Figure 5를 살펴보면, 지점별로 BHI가 조사시기에 따라 차이를

보이며, 중간값 71,67, 하위 25%에서 상위 25%까지의 BHI 범위는 61.7~79.8로서 비교적 양호한 저서건강도를 보이고 있었다. 그러나 정점 7(Station 7)에서는 2018년도에 BHI가 23을 나타내어 불량한 건강도를 나타냈으며 정점 1에서는 BHI가 감소하는 경향을 보이고 있어 지속적인 변화추이 분석이 필요하다.

해양저서생물 평가에 자주 이용되는 BPI를 활용하여 저서환경의 오염도를 평가하였다. 조사 해역에서는 2014년부터 2019년까지 6개 정점에 대해서 분기별 조사가 이루어졌으며 정점별로 시간이 지남에 따라 저서환경의 변화를 보이고 있었다. 조사 초기(2014년 4월)에는 정점 1을 제외하고 나머지 정점에서는 높은 오염도(V등급)를 보였으나 조사 마지막 시기(2019년 9월)에서는 정점 2와 5는 정상등급(I등급)으로 변화하였다. 하지만 정점 3과 4는 매우 심한 오염도(V등급)로 저서환경이 악화됨을 알 수 있었다. 그리고 정점 1과 6은 유사한 등급을 유지하였으며, 모든 조사 정점에서 조사시기별로 BPI의 변동을 확인할 수 있었다. 관측 자료 중 약 20% 정도만이 정상등급인 I등급을 유지하였으며, 매우 심한 오염도를 나타내는 V등급이 관측된 사례도 약 40%정도로 조사해역의 저서환경이 전반적으로 양호하지는 않은 것으로 나타났다(Figure 6).

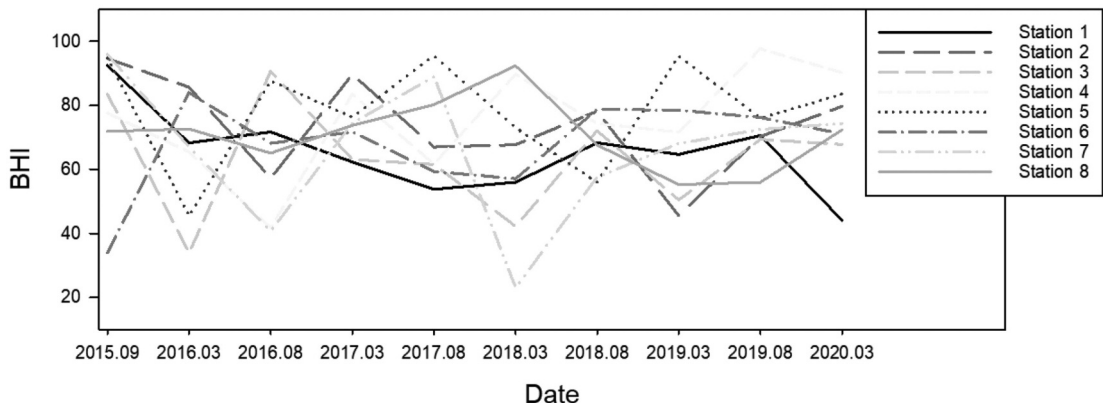


Figure 5. Variations of Benthic Health Index (BHI) at each station (very good (I): > 71, good(II): 51~70, bad (III): 26~50, very bad (IV): < 25).

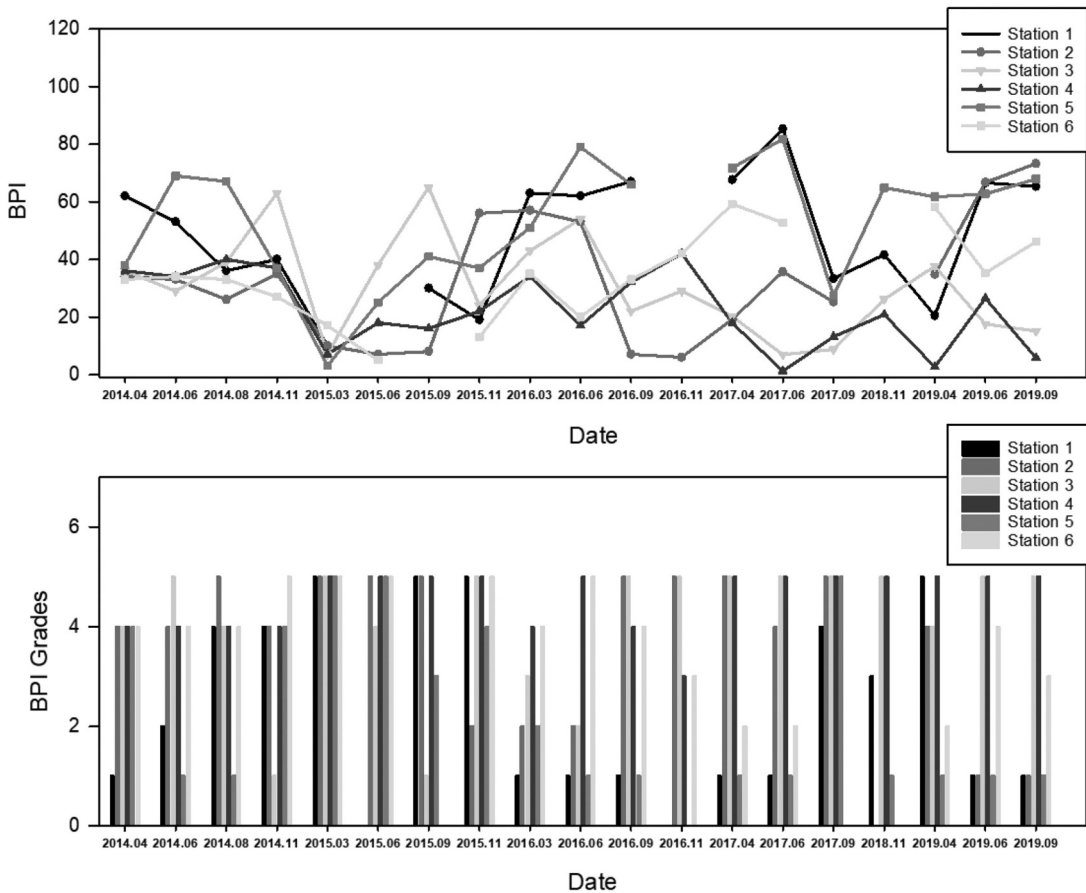


Figure 6. Variations of Benthic Pollution Index (BPI) and BPI grades at each station (normal (I) ≥ 60 , slightly polluted (II): 41~60, moderately polluted (III): 31~40, highly polluted (IV): 21~40, very highly polluted (V): ≤ 20).

IV. 고찰 및 토의

해양수질평가를 위하여 WQI가 널리 이용되고 있으며, 정부에서 측정하는 해양환경측정망 자료에서도 WQI의 정보가 제공되고 있다. 수질에 직접적인 영향을 측정할 수 있는 5개의 주요 항목에 대하여 해역별 기준값을 정하고 이를 토대로 평가 점수를 산정하여 해양수질을 평가하고 있다. 본 연구에서는 WQI를 이용하여 시간적 수질변화를 검토하였으며, 수질이 악화되었을 때, 개별 항목에 대한 평가 점수 변동을 통하여 구체적인 원인을 파악할 수 있었다. 최근 대부분의 환경영향평가서 및 사후환경영향조사결과 통보서에 WQI가 산정되고 있으며, 해양수산부고시(MOF 2018a)로 적용방법이 자세히 제시되어 해양개

발사업에 동 평가지수를 지속적으로 적용하는 것이 바람직하다.

해양수산부고시(MOF 2018a)에서는 해양퇴적물의 개별 항목(As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)에 대해서 주의기준과 관리기준을 설정하여 해양저질 환경을 파악하고 있다. 주의기준 농도는 부정적인 생태영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도이며, 각 항목의 관리기준 농도는 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도로 정의하고 있다. 개별 항목에 대한 농도 기준만 설정되어 해양저질환경에 대한 전반적인 평가를 수행하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서 사용한 EF는 7개의 평가등급을 이용하여 주의기준 및 관리기준만 정해진 해양수산부고시보다 오염 정도를 구체적으로 파악할 수 있

Table 6. Evaluation criteria of Benthic Pollution Index (BPI)

Location	Diversity Index	Richness Index	Evenness Index	Dominance Index	BPI
Station 1	2.36	2.40	0.96	0.91	57.30 (Slightly Polluted)
Station 2	4.01	3.03	0.94	0.95	33.33 (Moderately Polluted)
Station 3	2.93	2.70	0.93	0.92	60.98 (Normal)
Station 4	3.07	2.77	0.93	0.93	35.53 (Moderately Polluted)
Station 5	3.19	2.77	0.92	0.93	38.23 (Moderately Polluted)

으나 여전히 개별 항목에 대한 평가로서 종합적인 평가가 이루어지기에는 부족한 것으로 판단된다. 하지만 CIHC는 14개의 항목을 통합적으로 고려하여 해양저질환경을 평가한다는 점에서 해양저질 환경평가에 유용하게 활용될 수 있으며, 개별 항목에 대한 변화 추이를 분석하여 원인규명도 가능할 것으로 판단된다.

해양수산부고시(MOF 2018b)에 제시된 CIET도 해양저질환경을 판단하는데 이용될 수 있다. 미국에서도 오대호 담수퇴적물에 대한 오염도를 강열감량, COD, 인, 질소 등으로 구분하여 제시하고 있으며, 강열감량의 경우에는 5% 이하는 비오염, 5~8%는 중간오염, 8% 이상은 심한오염으로 정의한다. COD도 40,000mg/kg 이하는 비오염, 40,000~80,000mg/kg는 중간오염, 40,000mg/kg 이상은 심한오염으로 구분한다(Lee & Ryu 2000). CIET는 강열감량, COD, 산화발성황화물을 종합적으로 고려하여 부영양화를 판단하므로 개별 항목을 토대로 평가하는 것보다 전반적인 해양저질현황을 파악하는데 유용하다고 할 수 있다. 다만, 강열감량의 평가점수 범위 설정이 세분화되지 않아 강열감량 5~15%의 범위에서 동일한 점수가 주어진다는 점이 개선되어야 할 부분으로 사료된다.

저서생물평가에서는 BHI와 BPI를 활용하여 평가가 이루어졌다. BHI와 BPI는 저서생물을 그룹별로 구분하고 높은 유기물 농도에 출현하는 생물, 즉 오염지시종이 많을수록 저서생물환경이 악화되는 것으로 제시하고 있다. 대부분의 평가서에는 조사된 저서생물을 풍부도지수, 다양도지수, 균등도지수, 우점도지수와 같은 군집분석을 실시하고 있다. 하지만 지역적 특성을 고려한 다수의 정점조사 없이 몇 개 지점에

대한 단순 군집분석 평가만으로는 저서생물의 현황을 파악하는데 한계가 있다(Yoon et al. 2020). 환경영향평가서의 한 사례를 살펴보면(Table 6), 5개의 조사정점에서 관측된 자료에 대하여 군집분석을 수행하였다. 균등도지수와 우점도지수는 정점별로 차이가 없으며, 다양성지수와 풍부도지수에서는 일부 차이를 보이고 있다. 이처럼 군집분석 평가만으로는 지점별로 저서생물의 현황을 구별하기 어렵다. 반면 BPI는 정점별로 뚜렷한 차이를 확인할 수 있으며, 정점 3의 경우에는 타 정점보다 오염정도가 낮은 것으로 나타났다. 또한, BPI를 활용함으로써 사업이 진행되면서 저서생물변화를 즉시 파악할 수 있는 장점이 있다.

BHI와 BPI는 저서생물을 그룹별로 구분하고 높은 유기물 농도에 출현하는 생물, 즉 오염지시종이 많을수록 저서생물환경이 악화되는 것으로 제시하고 있다. 국립수산과학원고시에 제시된 BHI의 경우에는 저서생물에 대한 종 목록이 수록되어 있어, 그룹별 저서생물을 분류하는 데 객관적인 지수로 활용될 수 있다. 반면에 BPI의 경우에는 구체적인 목록이 제시되어 있지 않아 분류자에 따라 지수산정의 편차가 발생할 수 있다. 그리고 BHI와 BPI는 저서생물의 오염정도를 확인할 수 있는 좋은 평가지수이나 그 해역에 서식하고 있는 개체수량의 변화를 파악하는데 한계가 있다. 따라서 생태지수 및 군집지수 등과 병행하는 것이 필요하다.

본 연구에서 제시된 평가지수 이외에도 다양한 지수가 활용될 수 있다. Tanjung et al.(2017)은 해양수질을 평가하기 위하여 수질오염지수를 사용하였으며 지수값을 구하는데 19개 항목을 적용하였다. 해양퇴적물의 중금속 오염정도를 파악하기 위해 EF 이외에도 농집지수, 오염유입지수, 저질지수(sediment

quality index) 등이 활용되고 있다. 농집지수는 EF와 유사한 방법으로 지각 물질 중의 중금속 평균값과 로그함수를 이용하여 오염 정도를 7등급으로 구분한다. 오염유입지수는 해양에 서식하고 있는 홍합에서 농축된 오염물질 농도로 측정하여 오염정도를 제시하며 퇴적물지수는 유기오염물질과 중금속을 모두 포함하여 퇴적물의 오염정도를 산출하고 있다 (Angulo 1996; Park et al. 2013; Han et al. 2016; Tian et al. 2020). 다양한 평가 지수를 활용하여 다각도로 해양 퇴적물의 오염정도를 살펴보는 것이 객관성과 신뢰성을 높일 수 있으나, 지수에 필요한 조사를 모두 수행하게 되면 경제적 부담이 가중되므로 대상 해역에 적합한 방법을 선택하고 오염정도를 등급화하여 환경적 변화 추이와 영향을 명확히 제시하는 것이 중요하다.

V. 결론 및 시사점

기존에 작성된 환경영향평가서 및 사후환경영향조사결과 통보서의 조사된 자료를 추출하여 해양수질, 해양저질, 해양저서생물의 변화 추이를 분석하고 영향정도를 분석할 수 있는 지수를 산정하였다. 해양수질 분야에서는 용존무기질소, 용존무기인, 식물플랑크톤 농도, 투명도, 저층산소포화도를 포함하는 WQI를 활용하였으며 시·공간적 수질변화 및 수질악화의 원인을 파악하는 데 유용함을 확인하였다. 해양저질의 현황파악을 위해 EF, CIHC, CIET를 적용하였다. 지금까지 평가서 및 통보서에 개별 조사항목에 대하여 주의기준 및 관리기준 농도의 준수 여부만을 제시하여 전반적인 해양저질 환경을 파악하기에 한계가 있었다. 하지만 CIHC와 CIET를 활용하여 종합적인 해양저질 환경을 평가할 수 있었으며, 조사해역의 저질 환경의 변화를 정량적으로 파악하였다. 해양저서생물 분야의 경우에는 BHI 및 BPI가 활용될 수 있으며, 현재까지 사용된 풍부도지수, 다양도지수, 균등도지수, 우점도지수와 같은 생태지수보다 해역의 저서건강도 또는 저서오염도를 정량적으로 명확히 확인할 수 있었다.

우리나라는 사업시행자가 평가 주체이기 때문에

환경영향평가서 작성에 대한 공정성 시비가 발생하고 있으며, 대항비용 절감을 위해 무리한 계약과 그로 인한 부실 평가서 작성이 우려되고 있다. 그리고 사후환경영향조사 통보서에 사업시행으로 인한 환경적 영향을 면밀히 파악을 하여야 하나, 조사결과만을 제시하여 사후환경영향조사의 취지를 만족시키지 못하고 있다. 본 연구에서는 해양에서 주로 시행되는 사업을 토대로 해양환경의 변화 추이를 파악할 수 있는 다양한 평가지수를 소개하고 이들 평가지수의 활용성 및 개선방안을 제시하여 향후 내실 있는 평가서를 작성하는 데 기여할 것으로 판단된다.

마지막으로 동 연구에서 제시한 지수는 오염정도를 등급화하여 명확히 제시할 수 있는 장점이 있으나 세부적인 내용을 파악하기에는 한계가 있다. 따라서 다양한 지수가 국·내외적으로 활용되고 있으므로 이들 지수를 병행하여 사업으로 인한 환경적 영향을 구체적으로 파악하는 것이 필요하다.

사사

본 논문은 한국환경정책·평가연구원의 2021년도 일반사업 「환경평가 모니터링 사업(GP2021-05)」의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Angulo E. 1996. The Tomlinson Pollution Load Index Applied to Heavy Metal, 'Mussel-Watch' Data: A Useful Index to Assess Coastal Pollution. *Science of The Total Environment* 187(1): 19-56.
- Chen CW, Kao CM, Chen CF, Dong CD. 2007. Distribution and Accumulation of Heavy Metals in the Sediments of Kaoshiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, 66: 1431-1440.
- Choi JG and Park JH. 2015. Necessity of Follow-up Management and Practical Strategies for the Development of Environmental

- Impact Assessment. Environment Forum 19(7), Korea Environment Institute. p. 15. [Korean Literature]
- Choi JG, Park JH, Lee BK. 2019. The Future of Environmental Impact Assessment in Korea. Environment Forum 23(4), Korea Environment Institute. p. 21. [Korean Literature]
- Choi JW, Seo JY. 2007. Application of Biotic Indices to Assess the Health Condition of Benthic Community in Masan Bay, Korea. Ocean and Polar Research 29(4): 339-348. [Korean Literature]
- Choi SP. 2018. Environmental Impact Assessment and Judicial Review: Centering on Review of Precedents about Flaws in Environmental Impact Assessment. Journal of Law & Economic Regulation, 11(1): 157-174. [Korean Literature]
- Han GM, Hong SH, Shim WJ, Ra KT, Kim KT, Ha SY, Jang M, Kim GB. 2016. Assessment of Persistent Organics and Heavy Metal Contamination in Busan Coast: Application of Sediment Quality Index. Ocean and Polar Research, 38(3): 171-184. [Korean Literature]
- Han HS, Lee SH, Kim JC, Son DS, Ma CW. 2020. Distribution Patterns of the Organic Pollution Indicators at Subtidal on Coast Development in Korea. Journal of Environmental Impact Assessment, 29(2): 112-121. [Korean Literature]
- Hwang DW, Kim SG. 2011. Evaluation of Heavy Metal Contamination in Intertidal Surface Sediments of Coastal Islands in the Western Part of Jeollanam Province Using Geochemical Assessment Techniques. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 44(6): 772-784. [Korean Literature]
- Kim JC, Ma CW, Bok YW. 2014. An Ecological Study on Subtidal Macrofauna Inside and Outside of Saemangeum Dike. Korean Journal of Environment and Ecology 28(4): 442-449. [Korean Literature]
- Kong BW, Lee WJ, Ra DG, Cheong CJ. 2016. Analysis of Temporal-spatial Characteristics of Water Quality Using Water Quality Index in the Suncheon Bay. Journal of the Korean Society of Environmental Technology, 17(2): 96-104. [Korean Literature]
- Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM) 2021. Purification of polluted deposits; [cited 2021 Feb 19]. Available from: <https://www.koem.or.kr/site/koem/04/1040108000002019051004.jsp>
- Lee CH, Ryu HJ. 2000. A Study on the Development of Environmental Standards in the Freshwater and Seawater Sediment. Korea Environment Institute. p. 148. [Korean Literature]
- Lee JH, Park JY, Lee HG, Park HS, Kim DS. 2003. Environmental Assessment of the Shihwa Lake by Using the Benthic Pollution Index. Ocean and Polar Research 25(2): 183-200. [Korean Literature]
- Lee SW, Kim JK, Seo JK. 2018. A Study on the Issues and Improvement of the Existing Environmental Impact Assessment System: Evaluation in an Operator Viewpoint. Journal of Environmental Science International, 27(5): 281-289. [Korean Literature]
- Lim DI, Choi JY, Jung HS, Choi HW, Kim YO. 2007. Natural Background Level Analysis of Heavy Metal Concentration in Korean Coastal Sediments. Ocean and Polar Research, 29(4): 379-389. [Korean Literature]
- Liu S, Lou S, Kuang C, Huang W, Chen W, Zhang J, Zhong G. 2011. Water Quality

- Assessment by Pollution-Index Method in the Coastal Waters of Hebei Province in Western Bohai, China. *Marine Pollution Bulletin* 62: 2220-2229.
- Ministry of Environment (MOE). 2015. Guideline for Preparing a Post-environment Impact Survey Report. p. 27. [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). 2018a. Marine Environment Standard. 2018-10. [Korean Literature]
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF). 2018b. Regulations on the Scope of Investigation, Purification, Restoration, etc. of Marine Pollutant Sediment. Marine environment standard. 2018-15. [Korean Literature]
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2020. Regulations on Methods, Procedures, etc. for Evaluating Fishing Ground Environment. 2020-15. [Korean Literature]
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2021. Introduction of Fishery Environment Evaluation System; [cited 2021 Feb 19]. Available from: http://www.nifs.go.kr/page?id=fishing_env_intro
- National Law Information Center (NLIC). 2021. Environmental Impact Assessment Act; [cited 2021 Jan 27]. Available from: <https://www.law.go.kr/LSW/eng/engLsSc.do?menuId=2§ion=lawNm&query=Environment+assessment&x=0&y=0#liBgcolor28>
- Park JH, Jung JT, Lee CD, Kim JH. 2013. Study on the Characteristics of the Tidal Flat Sediments in Incheon Coastal Area(II) – Distribution of Heavy Metals and Assessment of Metal Contamination. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 14(3): 178-189. [Korean Literature]
- Ra KT, Kim JK, Kim ES, Kim KT, Lee JM, Kim SK, Kim EY, Lee SY, Park EJ. 2013. Evaluation of Spatial and Temporal Variations of Water Quality in Lake Shihwa and Outer Sea by Using Water Quality Index in Korea – A Case Study of Influence of Tidal Power Plant Operation. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 16(2): 102-114. [Korean Literature]
- Seo JY. 2016. A Study on the Determination of Threshold Value of Benthic Community Health and Application of Benthic Pollution Index (BPI) to Special Management Areas the Southern Coasts of Korea. Master Thesis, Pusan National University. p. 138. [Korean Literature]
- Seo JS, Maeng JH, Lim EP, Jin SJ, Kim HM, Kim TY. 2019. Marine Environmental Characteristics Around the Test Phase off Offshore Wind Farm in the Southwestern Coast of Yellow Sea. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 28(5): 457-470. [Korean Literature]
- Tanjung RHR, Hamuna BA. 2019. Assessment of Water Quality and Pollution Index in Coastal Waters of Mimik, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering* 20(2): 87-94.
- Tian K, Wu Q, Liu P, Hu W, Huang B, Shi B, Zhou Y, Kwon BO, Choi K, Ryu J, Khim JS, Wang T. 2020. Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments and Water from the Coastal Areas of the Bohia Sea and the Yellow Sea. *Environment International* 136: 105512.
- Wardiatno Y, Qonita Y, Mursalin, Zulmi R, Effendi H, Krisanti M, Mashar A, Hariyadi S, Hakim AA, Sahidin A, Widigdo B, Nursiyamah S. 2017. Determining Ecological Status of Two Coastal Waters in Western Java Using Macrozoobenthic Community:

- a Comparison Between North Part and South Part. Earth and Environmental Science 54: 012071.
- Woo JS, Lee HJ, Park JK, Park KK, Cho DJ, Jang DJ, Park SJ, Choi MS, Yoo WK. 2019. Background Concentration and Contamination Assessment of Heavy Metals in Korea Coastal Sediments. Journal of the Korean Society of Oceanography 24(1): 64-78. [Korean Literature]
- Yoo HS, Lee YJ, Chun DJ, Hwang JW. 2017. A Study on Introduction of Deposit System for Fairness of Environment Assessment. Korea Environment Institute. p. 69. [Korean Literature]
- Yoon KT, Jung YH, Kang RS. 2010. Discussion to Spatial Characteristics on A Sub-tidal Benthic Community Composed to the Complicated Coastal Lines Around Tongyeong, Korea. Ocean and Polar Research 32(2): 123-135. [Korean Literature]