

위험평가모형(TrophicTrace®)을 이용한 가상 해양오염퇴적물의 쥐노래미와 인체 영향 예비평가

Potential Human Health and Fish Risks Associated with Hypothetical Contaminated Sediments Using a Risk Assessment Model (TrophicTrace®)

양동범[†] · 홍기훈 · 김경련
Dong-Beom Yang[†] · Gi-Hoon Hong · Kyung-Ryon Kim

한국해양연구원 특정해역보전관리연구센터
Concerned Marine Areas Management Center, Korea Ocean Research & Development Institute

(2010년 9월 19일 접수, 2011년 1월 21일 채택)

Abstract : The sediment removal index derived from the chemical contaminants, CI_{HC} , is currently in use to identify and define the spatial extent of the contaminated sediments in the sea. In order to analyze the sensitivity of the ecological and human risk associated with contaminated sediment, we evaluated five hypothetical contaminated sediments, whose CI_{HC} values are identical but consisted of different contaminant contents, using *TrophicTrace*® model dedicated to evaluate sediment risk, against the resident greenling (*Hexagrammos otakii*) and humans by calculating No-Observed-Adverse-Effect-Level based Toxicity Quotient (NOAEL TQ) and Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level based Toxicity Quotient (LOAEL TQ), and cancer risks and hazard indices (HI), respectively, based on the site conceptual model and exposure assumptions of fish ingestion to human receptor populations. NOAEL and LOAEL TQ values varied as much as a factor of 2 among 5 hypothetical sediments. Chemical element specific contribution to the carcinogenic risk and HI varied also greatly in these sediments. The reason for this significant dissimilarity in ecological and human risk stems from the different risk of each contaminant to the resident fish and human receptor. When the conceptual food web model is constructed for the target biological species for a given site, the ecological and human risk analysis considering trophic transfer of contaminants will add a ecosystem based tool for the management of contaminated sediments.

Key Words : Sediment Removal Index, *Hexagrammos Otatii*, *Trophic Trace*, NOAEL, LOAEL

요약 : 본고에서는 현재 시행중인 해양오염퇴적물질 관리용 유해화학물질 정화지수(CI_{HC})를 대상으로, CI_{HC} 은 동일하나 유해물질별 함량이 다른 해저퇴적물들이 같은 생물위험을 보이는가를 판단하려 하였다. 이를 위해 5개의 가상 오염퇴적물을 설정하고, 퇴적물 위험평가를 위한 트로픽트레이스 모형(*TrophicTrace*® model)을 이용하여, 이 가상 퇴적물이 쥐노래미(*Hexagrammos otakii*)에 대해 미치는 생물위험을 최대무작용량에 기반한 독성지수(NOAEL TQ)와 최소작용량에 기반한 독성지수(LOAEL TQ)로 평가하였다. 쥐노래미에 대한 NOAEL TQ의 합계는 5개 가상 오염퇴적물에서 0.69~1.54의 범위였고, LOAEL TQ의 합계는 0.111~0.261로 약 2배 이상의 차이가 났다. 이는 퇴적물 유해물질 환경기준이 해양저서무척추동물군집에 대한 영향만을 고려하고 사람으로 연결되는 식용의 쥐노래미에 대한 영향을 반영하지 않기 때문으로 사료된다. 인체에 대한 비발암위험지수(HI) 값은 PCB의 경우 9.8~47.1로 매우 위험한 것으로 나타났다. PCB의 발암위험도는 5개 퇴적물에서 $39\sim 190 \times 10^{-5}$ 으로 높게 나타났으며 As의 경우에도 $8.1\sim 18.0 \times 10^{-5}$ 으로 높게 나타났다. 유해화학물질정화지수가 8로 동일한 5개 가상 오염퇴적물에서 비발암위험지수(HI) 및 발암위험도가 서로 매우 다르게 나타난 것은 각 오염물질별로 인체에 악영향을 미치는 정도가 다르기 때문이다.

주제어 : 퇴적물정화지수, 쥐노래미, 트로픽트레이스, 최대무작용량, 최소작용량

1. 서론

연안 해역 퇴적물은 해저면을 구성하여 생물서식지로서의 역할 뿐만 아니라, 선박의 통상적인 운영으로부터 해역으로 배출되거나, 고의적으로 처분한 폐기물, 대기경로로 유입된 오염물질들을 저장하고 있다.¹⁾ 그러므로 상층 해수는 청정하나 해저 퇴적물은 오염되어있는 경우가 도시해역에서는 흔하다.²⁻⁴⁾ 연안 해역은 대개 영양물질이 과잉 입력되어 해저퇴적물에는 유기물이 풍부하므로,⁵⁻⁸⁾ 유기물의 분해로 인하여 해저 퇴적물은 수직적으로 산화환원준위가 급격히 변하고, 이로 인해 퇴적물에 흡착되어있던 오염물질이

상부 수층으로 용출되거나 오염된 퇴적물을 퇴적물식자가 섭취하여 먹이망을 통해 포식자인 물고기로 이동하며 이를 섭취하는 인간에게도 위험을 끼치게 된다.^{9,10)} 김이나 미역, 다시마 등 식물이 해수나 해저퇴적물의 오염물질을 흡수하므로, 이를 섭취하는 인간에게도 위험을 끼치게 된다. 이는 육상 환경과 해양, 하천, 호수 등이 육상환경과는 크게 다른 점이다.

퇴적물 오염은 관리기준 이하의 준설물질의 외해 투기 평가에서 중요한 위험요인이다. 준설작업 시 해저면의 굴착에 따른 산화환원 준위 변동으로 인하여 퇴적물 내에 갇혀있던 오염물질들이 주변해역으로 확산되고, 또 해역에 투기

[†] Corresponding author E-mail: dbyang@kordi.re.kr Tel: 031-400-6157 Fax: 031-408-4493

시 퇴적물에 흡착된 오염물질이 수중으로 재부유되어 2차 오염을 일으키기도 한다. 따라서 준설사업 시행 전에 퇴적물의 오염특성규명과 퇴적물이 해양생태계에 어떠한 영향을 미치고 있는가를 파악하여야 한다. 그러므로 해저 퇴적물 준설공사와 준설물질의 해양투기는 국내적으로나 또 국제적(폐기물 및 기타 물질의 투기로 인한 해양오염방지협약 1972의 1996년 의정서, 이하 런던의정서)으로 엄격히 관리되고 있다. 또한 최근 연안해역의 오염퇴적물 수거와 처리는 중요한 연안해역 환경관리 사업으로 등장하고 있다. 해저퇴적물이 오염된 해역의 정화복원사업의 목표는 오염된 해저퇴적물을 상부 표영생태계(pelagic ecosystem)로 부터 격리하는 것이다. 그 방법으로는 일단 오염원을 차단하여 추가적인 오염 방지사업을 실시하고, 오염된 해저퇴적물을 퇴적물-상부해수간의 물질교환을 차단하는 차단막을 해저면에 설치하거나(in situ capping), 해저면을 굴착하고 오염퇴적물을 그 굴착공간에 배치하고 상부에는 청정퇴적물로 피복하는 방법(capping)과 오염퇴적물을 인양하여 다른 곳으로 이동하는 준설 방안(removal)이 있다. 그러나 우리나라의 경우 오염퇴적물이 대부분 도심해역에 존재하므로 준설하여 오염원 자체를 제거하는 것이 가장 현실적인 대안으로 보인다.

환경오염에 대하여 과거에는 피해의 유무, 즉 정성적인 인과관계 규명에 주력하였으나 정차오염피해의 규모를 계량하는 방향으로 발전되고 있다. 우리나라는 해양퇴적물 관리 법제의 미비로 인해 준설된 퇴적물은 오염정도에 상관없이 연안해역 매립사업에 매립재로 투입하거나 외해역에 투기하였다. 그러나 외해역 투기에 관한 준설물질의 처리기준을 도입하여 2008년 8월 22일부터 제1기준을 초과하는 유해물질을 함유할 경우, 해양투기를 불허하고 있다. 2011년 2월 22일부터는 제2기준 이하의 퇴적물은 외해역에 투기할 수 있으나, 제1기준 이하이면서 제2기준 이상인 오염물질을 함유한 수저준설토사에 대하여서는 해양환경관리법 시행규칙 제12조 제2항에 의하여 국토해양부장관이 정하는 정밀평가를 거쳐 해양투기 허용 여부를 판단하게 되었다.¹¹⁾ 그러나 외해투기 이외의 방안에 대하여서는 특별히 규정하지 않고, 최선의 방안을 행정청이 선정하도록 위임하고 있다. 어떤 관리대안이 오염퇴적물을 적절히 관리할 수 있는가를 결정하는 데에는 몇 가지 어려운 점이 따른다. 퇴적물관리에는 서로 충돌하는 목표들이 공존하기 때문이다. 해양오염퇴적물 정화사업은 해역으로부터 오염된 퇴적물을 준설제거하고, 육상에서 그 준설물을 최종처분장의 용도별 토양환경관리기준을 충족하도록 오염물질함량을 감축하고 가공해야 하므로 비용이 지역별로 수 백억원 규모이다. 그러므로 동일한 유해화학물질정화지수를 가진 오염퇴적물이 복수의 장소에 소재하는 경우, 이들 지역간의 정화 우선 순위를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이 우선순위를 결정하는 데 준설물질에 대하여 개발된 TrophicTrace® 생태위험평가모형의 적용성을 검토하고자 한다.

2. 재료와 방법

2.1. 해양 오염퇴적물관리 상의 유해화학물질 정화지수(C_{HC})

유해화학물질로 오염된 퇴적물의 정화범위 설정에 대한 법적인 기준을 마련하기 검토중인 해양오염퇴적물 조사 및 정화범위 등에 관한 규정(안)에서 정한 유해화학물질 정화지수(C_{HC})를 연구대상으로 선정하였다. 이 규정은 해역관리가청이 해양환경관리법 제18조, 같은 법 시행령 제24조 및 같은 법 시행규칙 제9조에 따라 해양오염퇴적물에 대하여 조사와 수거를 함에 있어 시행규칙 제9조 제3항 및 제4항에 따라 그 절차나 기준 등을 정함을 목적으로 2010년 4월에 제정되었다.

이 규정(안)에서의 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 평가점수 산출방식은 Table 1과 같다. 여기서 퇴적물의 기준농도(제1기준과 제2기준)는 각 평가항목(오염물질)의 저서무척추 생물군집이 받는 영향에 기반하여 설정된 것이다. 유해화학물질 관련 항목들에 대한 각각의 평가점수는 해저퇴적물시료에서 구한 항목들의 분석치로부터 제1기준과 제2기준의 농도를 이용하여 산출하는데 분석치가 제1기준 이하의 농도범위를 가진 항목은 항목별 평가점수를 0으로 한다. 해저퇴적물시료에서 구한 분석치가 제1기준 이상 이면서 제2기준 미만의 농도범위를 가진 항목에 대해서는 분석치에서 제1기준의 농도를 뺀 값을 제2기준의 농도에서 제1기준의 농도를 빼준 값으로 나눈 값을 평가점수로 한다. 분석치가 제2기준 이상인 항목들에 대한 평가점수는 분석치를 제2기준의 농도로 나눈 값으로 한다.

이 규정(안)에 의거 퇴적물을 대상으로 14개 유해화학물질 혹은 물질군별로 평가점수를 계산하고, 그 합에 의해 산출된 유해화학물질 정화지수는 공간적인 정화범위를 설정하

Table 1.* Parameters, reference concentrations and calculation methods of the purification index for hazardous chemicals

Chemicals	Unit	Criteria 1**	Criteria 2***
As	ppm (dry wt.)	9.0	41.6
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
Chlordane	ppb (dry wt.)	0.5	6.0
Dieldrin	"	0.02	8.0
DDT	"	1.6	46
PCBs	"	21.6	189
PAHs	"	4,000	45,000
TBT	"	5.0	105

고, 그 퇴적물을 해역으로부터 제거 여부를 판단하는 결정 수단 중의 하나이다. 이 규정(안)에 의하면, 행정적으로 CI_{HC} 가 2 미만이면 오염되지 않은 것으로 간주하고, 2에서 4미만일 경우 어시장에 활어용수 공급을 하거나 휴양지인 경우는 오염퇴적물을 제거하고, 야생동물서식지나 항로인 경우에는 면밀히 환경영향을 감시하도록 하며, 4이상이면 오염퇴적물을 제거하도록 권장하고 있다. 그리고 이 지수는 전국의 여러 오염해역 중, 혹은 특정 해역 중 오염부지별로 정화사업의 우선순위를 결정하는 데도 사용될 수 있다.

2.2. Trophic Trace® 모형

해저퇴적물의 오염에 따른 생물 및 인간 위험을 평가하는 도구 중 본 소고에서는 미국 육군공병단 (USACE) 오염 퇴적물센터(Center for Contaminated Sediment)에서 퇴적물에 존재하는 오염물의 생물축적에 따른 인간과 생태적 위험평가를 위해 1990년 대 후반에 개발하고 현재 미국의 육군 공병단과 환경청에서 사용중인 TrophicTrace® 소프트웨어를 사용하였다.^{12,13)} 이 모형에서 오염물질의 생물축적은 해수-해저퇴적물-생물체조직 간의 오염물질의 평형을 가정하여 계산한다. 해수 중 오염물질의 용존 성분 농도는 측정된 것을 직접 입력할 수도 있고 퇴적물로부터의 평형분배를 가정한 계산값을 사용할 수도 있다. 이 모형에는 28일간 배양에 의한 생물농축 실험결과를 입력할 수도 있다. 이 실험결과들은 평형상태에 도달되지 않았을 수 있기 때문에 K_{ow} (옥타놀-물 분배계수)에 따른 보정이 모델 안에서 이루어진다.¹⁴⁾ 물고기 체내 유기오염물질의 함량은 해수·퇴적물 기반 먹이그물에 따른 이동, 금속은 무척추 동물로부터 물고기로의 영양전이계수(Trophic Transfer Factor, TTF) 또는 해수로부터 물고기로의 생물축적계수(Bioconcentration Factor, BCF)를 이용하여 계산한다.^{15,16)} 생태 위험은 대상 생물의 조직 내 오염물질함량과 일일 섭취량을 근거로 해당 독성기준치(Toxicity Reference Value, TRV)와 비교하여 평가한다. TRV는 어류의 경우 악영향이 나타나기 시작하는 체조직의 오염물질 함량인 임계잔류량(Critical Body Residue, CBR) 초과 여부로 판단한다. 포유류, 조류, 인간의 경우 일일 섭취량이 악영향을 나타내기 시작하는 최소작용량(Lowest Observed Adverse Effects Levels, LOAELs)이나, 악영향을 나타내지 않는 최대무작용량(No Observed Adverse Effects

Levels, NOAELs), 또는 노출된 생물 중 50%가 죽는 섭취량(LD₅₀), 노출된 생물 중 50%가 죽는 함량(LC₅₀), 노출된 생물의 50%가 아치사영향을 받는 섭취량(ED₅₀), 노출된 생물의 50%가 아치사영향을 받는 함량(EC₅₀) 등 실험적으로 얻어진 독성 종말점 중 적절한 것을 사용한다. LOAEL을 초과하는 경우 큰 위험을 의미한다. 미국 EPA는 NOAEL에 기반한 독성기준치 값을 노출 값과 비교하여 위험평가를 하고 있다. 사용자는 대상 해역별, 대상 생물별로 해역 생물 먹이 사슬을 설정하고, 주민들의 식성 등을 포함한 자료 라이브러리를 구성할 수 있다.

이 모델에는 시험대상 퇴적물의 위험 범위를 파악하도록 불확실성 분석 알고리즘이 포함되어 있다. 사용자는 관련 항목에 점 추정치를 단순하게 입력하지 않고 불확실성을 묘사하기 위한 사다리꼴 퍼지숫자로 그 항목이 존재할 수치적 범위를 입력할 수 있다. 퍼지집합에서는 각 대상이 어떤 모임에 속한다 또는 안 속한다는 이진법이 아니라 각 대상이 그 모임에 속하는 정도를 소속함수(Membership function)로 나타낸다. 사다리꼴 퍼지숫자(Trapezoidal Fuzzy Number)의 항목의 값은 $F = [A, B, C, D]$ 로 주어진다. A는 최소가능치(Minimal possible value), B는 개연성 있는 최소값(Minimal probable value), C는 개연성 있는 최고값(Maximal probable value), D는 최대가능치(Maximal possible value)를 말한다. A에서 D의 범위는 가능한 최소값에서 최대값 까지이며 B, C는 개연성 있는 값의 범위이다. 이 불확실성은 분석과정에 반영되며 모델결과도 역시 사다리꼴 퍼지숫자로 표시된다.

3. 가상 퇴적물, 가상 어류, 개념 모델, Trophic-Trace® 입력자료 선정

3.1. 가상퇴적물 설정

유해물질의 함량은 다르나 유해화학물질정화지수는 동일한 오염퇴적물 5개 부지를 설정하였다(Table 2). 유해물질 함량은 국내 해양퇴적물의 오염을 참조하여 국내에 존재할 수 있는 오염퇴적물로 설정하였다.^{2,17)}

3.2. 가상 시험 어종 설정

Table 2. Concentration of pollutants in sediments, scores and purification index for hazardous chemicals (CI_{HC}) at 5 hypothetical marine contaminated sediments

Chemicals	Unit	site A		site B		site C		Site D		site E	
		Conc	Score								
As	ppm (dry wt.)	9.8	0.02	11.2	0.07	10.5	0.05	13.8	0.15	21.3	0.38
Chlordane	ppb (dry wt.)	15.0	2.50	40.8	6.80	42.4	7.07	5.2	0.85	27.1	4.52
DDT	ppb (dry wt.)	240.0	5.22	34.8	0.75	3.5	0.05	246.0	5.35	108.9	2.37
PCB	ppb (dry wt.)	65.2	0.26	86.0	0.38	160.0	0.83	312.0	1.65	145.0	0.74
Purification index for hazardous chemicals (CI_{HC})		8.0		8.0		8.0		8.0		8.0	

시험어종은 쥐노래미(*Hexagrammos otakii*)를 선정하였다. 쥐노래미는 썸뱅이목 쥐노래미과에 속하는 어류로 성체의 체장은 약 40 cm, 체중은 약 2 kg 정도이며, 바닥이 모래나 진흙으로 된 곳이나 암초가 있는 연안 등에 서식하여 식용으로 판매된다. 보통 활동이 활발하지 않으며, 배 부분을 바위나 돌에 닿은 채 생활하여 부레가 없다. 산란기는 10~1월이며 어릴 때에는 표층을 헤엄쳐 다니며, 플랑크톤을 먹는다. 자라면서 바다 밑바닥으로 내려가며, 바다 밑바닥에 사는 게, 새우, 갯지렁이, 어류 등을 잡아먹는다.¹⁸⁾ 저서 동물은 퇴적물 식자이거나, 퇴적물 표면에 서식하는 박테리아를 섭식한다. 따라서 저서동물을 섭식하는 쥐노래미는 퇴적물에 존재하는 금속이나 유기오염물질의 인간 영향을 조사하기에 적합한 어종이다.¹⁹⁻²¹⁾

3.3. 개념모형 구성

대상 해역의 개념모형(Conceptual model)은 퇴적물에 함유된 오염물질이 쥐노래미에 어떻게 축적되는지의 경로를 보여준다. 쥐노래미 앞 단계의 먹이 그물은 Kwak et al.¹⁸⁾ 및 김과 강²²⁾의 쥐노래미 위 내용물 분석결과를 참고하였고 모델에 적용하기 위해 먹이그물을 단순화하였다. 쥐노래미가 취하는 먹이는 갯지렁이 25%, 여러 십각류 25%, 단각류 및 기타 저서성 동물성플랑크톤 25%, 패류 5%, 두족류 및 소형어류 20%라고 추정하였다. 갯지렁이, 패류는 퇴적물 중 오염물질에 직접 노출된다고 보았고 퇴적물부터 해수로 용출된 오염물질은 십각류, 단각류 및 기타 동물성플랑크톤, 두족류 및 소형어류에 축적된다고 보았다. 물론 이러한 개념모형이 실제 먹이그물을 완벽하게 대표할 수는 없으나 오염퇴적물의 위험평가를 위해서는 합리적인 접근방법이라고 생각된다. 실제 미국 New Port Bay Rhine Channel 퇴적물의 복원을 위한 평가 등 여러 지역의 오염퇴적물 위해성 평가에서 이러한 단순화된 먹이그물을 TrophicTrace® 모형에 사용한바 있다.²³⁾ 더욱이 이 연구에서는 화학조성이 다른 동일 유해화학물질정화지수 퇴적물들의 어류 위험을 상대적으로 비교하기 위한 것이기 때문에 단순화된 먹이그물을 적용하더라도 큰 무리가 없다.

3.4. TrophicTrace® 계산과정 및 입력자료

TrophicTrace® 모형은 버전 4.1을 사용하였다. 입력자료 중에는 추정치를 사용해야 하는 경우가 많으므로 이러한 값들을 아래에 밝혀 도출된 결과가 해당 기준에서 얻어진 결과임을 분명히 하였다. 해수 중 오염물질 농도는 직접 입력하지 않고 퇴적물의 농도로부터 분배계수에 의해 계산되도록 하였다. 이 계산을 위한 용존성 유기탄소 농도는 1.2 mg/L, 입자상 유기탄소에의 분배계수인 logK_{oc} 값은 DDT, Chlordane, PCB에 대해 각각 6.42, 6.06, 6.19를 입력하였다.²⁴⁾ As의 퇴적물/해수 분배계수(K_d)는 2.5를 입력하였다.²⁴⁾ 갯지렁이, 패류체내의 유기오염물질 농축은 다음 식과 같은 저서생물-퇴적물 농축계수(Biota Sediment Accumulation Factor, BSAF)에 의하여 계산되었다.

저서생물-퇴적물 농축계수(BSAF) =

$$\frac{\text{생물체내농도/생물체내지방성분함량}}{\text{퇴적물내농도/퇴적물중유기탄소함량}} \quad (1)$$

PCB, Chlordane, DDT의 BSAF값은 1.7을 사용하였다.²⁶⁾ 갯지렁이의 체내 지방성분 함량은 1.3%를 사용하였으며 패류체내 지방성분 함량은 사다리꼴 퍼지숫자로 [1.5, 2.5, 3.5, 5]를 사용하였다.²⁷⁾ 퇴적물 중 유기탄소의 농도는 모든 지점에 대해 사다리꼴 퍼지숫자로 [1, 2, 5, 7]를 사용하였다. 여러 십각류, 단각류 및 기타 동물성플랑크톤, 두족류 및 소형어류의 오염물질 축적은 생물축적계수(BCF)에 의해 계산되었다. 생물축적계수(BCF) 값으로 As의 경우 3.5를 사용하였고 유기오염물질의 경우 체내지방성분함량×K_{ow}(물-옥타놀분배계수)를 사용하였다. 입력된 지방성분함량은 3.3%였으며 logK_{ow} 값은 Chlordane, DDT, PCB에 대해 각각 6.16, 6.0, 6.3였다.²⁶⁾

어류체내의 오염물질축적량은 다음 식에 의하여 주어진다.^{28,29)}

$$\text{어류체내농도} = \frac{\text{먹이섭취율} \times \text{먹이중의농도}}{\text{성장률} + \text{제거율} + \text{대사율}} \quad (2)$$

어류체내 오염물질 축적량 계산을 위한 쥐노래미의 생물체내 지방 함량은 0.92%를 사용하였고 쥐노래미가 전 생애를 그 지역에서 서식한다고 가정하였다. 쥐노래미의 최대무작용량 값에 기반한 임계잔류량(NOAEL-based CBR) 값은 As는 0.47, Chlordane은 1.38, DDT는 2.4, PCB는 1.9 mg/kg wet weight을 사용하였다.²⁶⁾ 최소작용량에 기반한 임계잔류량(LOAEL-based CBR) 값은 As는 4.7, Chlordane은 3.18, DDT는 24, PCB는 9.3 mg/kg wet weight을 사용하였다.²⁴⁾ 인체의 비발암 위험지수(Hazardous index, HI)를 계산하기 위한 기준노출량(Rfd)은 As, PCB, DDT, Chlordane에 대해 각각 0.003, 0.00002, 0.0005, 0.0005 mg/kg/day를 입력하였다.²⁶⁾ 발암위해도 계산을 위한 발암잠재력(Cancer Slope Factor)값은 As는 1.5, PCB는 2.0, DDT는 0.34, Chlordane은 0.35(mg/kg/day)⁻¹을 입력하였다.

4. TrophicTrace® 적용 결과

4.1. 어류

가상 오염퇴적물과 가상 어류인 쥐노래미에 대하여 식 (3)에 의하여 최대무작용량에 기반한 독성지수(NOAEL TQ)와 최소 작용량에 기반한 독성지수(LOAEL TQ)를 계산하였다.

$$\text{독성지수}(TQ) = \frac{\text{어류체내 오염물질축적량}}{\text{어류체내오염물질 임계잔류량}(CBR)} \quad (3)$$

최대무작용량에 기반한 독성지수(NOEL TQ)의 경우 어류체내 오염물질 임계잔류량이 최대무작용량에 기반한 값이었다. 모델의 계산결과는 Fig. 1에 최대무작용량에 기반

한 독성지수(NOEL TQ)를 정리하였고 Table 3에 최대무작용량에 기반한 독성지수(NOEL TQ)의 최대가능치, Table 4에 최소 작용량에 기반한 독성지수(LOEL TQ)의 최대가

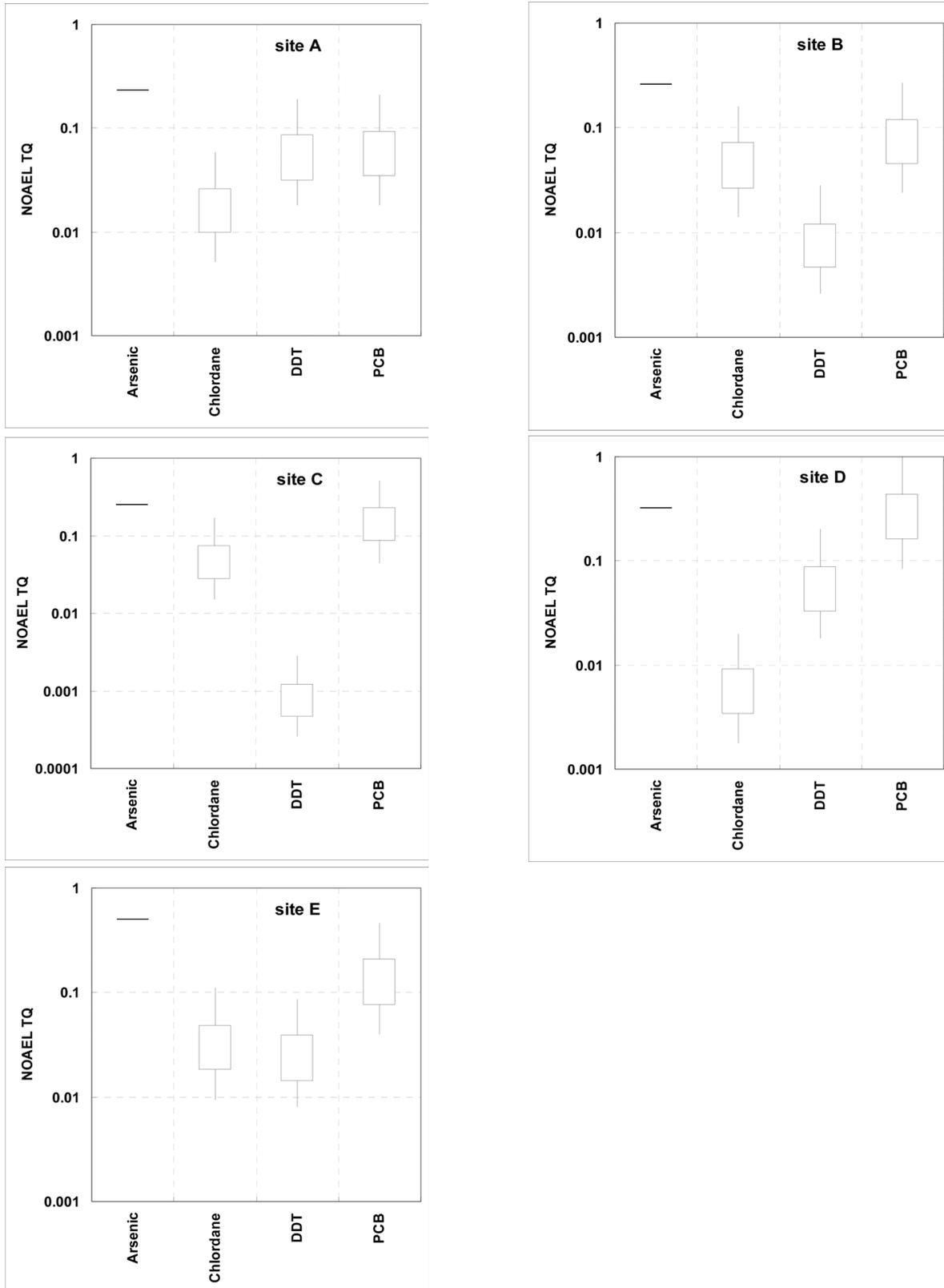


Fig. 1. NOEL based Toxicity Quotients calculated for *Hexagrammos otakii*.

능치를 정리하였다. 생물체내 오염물질농도와 최대무작용량에 기반한 임계잔류량이 같아질 때 최대무작용량 독성지수(NOEL TQ)는 1이 되고 이는 대상 생물이 오염 영향을 받는 상태이다(Fig. 1). 그림에서 박스상단과 하단은 각각 개연성 있는 최고값(Maximal probable value), 개연성 있는 최소값(Minimal probable value)을 나타내며 연결선의 상단과 하단은 최대가능치(Maximal possible value)와 최소가능치(Minimal possible value)를 나타낸다. 계산된 독성지수 값은 사다리꼴 퍼지숫자로 제시하였다. 무기물질인 As의 경우 입력된 값들이 사다리꼴 퍼지숫자가 아닌 점추정치여서 독성지수 결과도 단일한 값을 가진다. 가상퇴적물 A의 경우 유해화학물질 정화지수(CI_{HC})는 As가 0.02로 가장 낮고 DDT가 5.22로 가장 높으나, NOEL TQ는 As가 DDT보다 높다. 가상퇴적물 D의 경우, 평가점수는 As, Chlordane, PCB, DDT의 순으로 커지는데, 유기오염물질인 Chlordane, PCB, DDT의 NOEL TQ는 평가점수와 비례하나, 반금속인 As는 높게 나타났다. 5개 가상 퇴적물(Table 2)의 오염물질별 평가점수와 NOEL TQ의 최대가능치 사이의 관계(Fig. 2)를 보면 PCB와 반금속인 As가 NOEL TQ에 크게 반영되는 것으로 보인다. DDT와 Chlordane은 평가점수의 증가가 독성지수에 적게 반영되었다. 이들 오염물질의 해양오염퇴

Table 4. Maximal possible values of LOEL TQ for *Hexagrammos otakii* at 5 hypothetical marine contaminated sediments

Hazardous chemical	Hypothetical marine contaminated sediment				
	A	B	C	D	E
As	0,023	0,026	0,025	0,032	0,05
Chlordane	0,026	0,07	0,072	0,0089	0,046
DDT	0,019	0,0028	0,00028	0,02	0,0087
PCB	0,043	0,056	0,1	0,2	0,095
sum	0,111	0,155	0,197	0,261	0,200

적물 관련 제1, 제2기준은 PCB에 비해 상당히 낮아 농도의 증가(평가점수의 증가)는 무척추동물에 큰 영향을 줄 것으로 보인다. 그러나 어류에 미치는 영향은 상대적으로 적어 농도의 증가가 독성지수의 증가에 크게 반영되지 않는 것으로 보인다.

위에서 보는 것처럼 5개 지역의 쥐노래미에 대한 위해성은 화학조성의 차이가 실제 위험의 차이를 초래하였다. NOEL TQ의 최대가능치 합계는 5개 가상 퇴적물에서 0.69~1.54의 변화를 보였다(Table 3). 퇴적물중의 오염물질 농도로부터 계산한 유해화학물질 정화지수는(평가점수 합계)는 모두 8.0이지만 생태계 위험에는 2배 이상의 차이가 있었다. LOEL TQ의 최대가능치 합계는 5개 가상 퇴적물에서 0.111~0.261의 변화를 보여 2배 이상의 차이를 보였다(Table 4). 그러나 가상의 5개 오염퇴적물 상부 수층에서 서식하는 쥐노래미 자체에 대한 생물 독성은 위험하게 작용하지는 않는다. 즉 이는 우리가 오염퇴적물이 존재하는 해역에서 넘치나 쥐노래미 등 저서어류를 흔히 볼 수 있는 이유이다.

유해물질의 함량은 다르나 동일 지수를 갖는 가상의 오염퇴적물에 대한 쥐노래미에 대한 위험을 TrophicTrace® 모형을 적용하여 평가한 결과 퇴적물에 따라 많은 차이를 보이는 이유는 해양오염퇴적물 특성구명에 사용된 제1, 제2기준은 저서생물군집의 영향만을 고려한 것이고, 어류 종별 및 오염물질별 영향을 고려하지 않았기 때문이다. 실제 물고기 체내에 축적되는 오염물질의 양은 대체로 체지방 함량에 비례하고, 물고기의 종류에 따라 독성기준치도 다르다. 그리고 여러 종의 물고기와 그 상위단계 먹이그물까지 동시에 고려하면 더욱 많은 차이를 보이게 될 것이다. 이 계산에서는 유기탄소 함량이 같은 퇴적물을 가정하였지만 각 지역마다 해수, 퇴적물의 유기탄소의 함량이 다르기 때문에 오염물질 축적량도 다를 수 있다. 따라서 오염퇴적물의 생태계 및 인체에 대한 영향을 구체적으로 평가하기 위해서는 그 해역의 환경조건, 서식생물 종류 등이 종합적으로 검토되어야 하는 것이 바람직할 것이다.

오염퇴적물 관리에서 유해화학물질 정화지수가 8이면 상당히 오염된 퇴적물이라 할 수 있는데도 쥐노래미에 대한 NOEL TQ가 모든 오염물질에 대해 1 이하로 그리 높지 않게 나타난 것은 역시 본고에서 생태위험을 대상 생물(여기서는 쥐노래미)에 국한시켰기 때문이다.

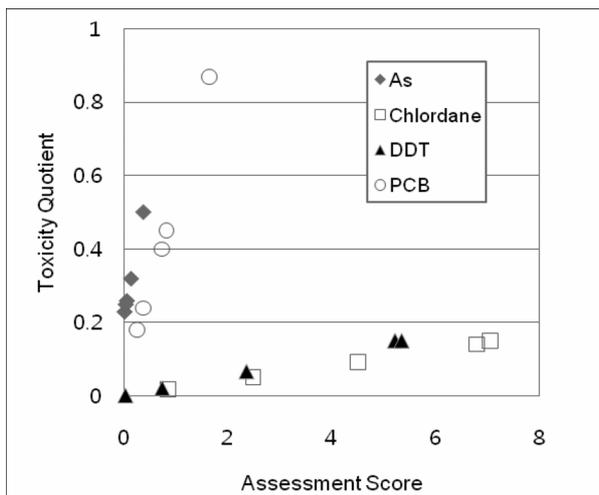


Fig. 2. Relation between the maximal possible value of NOEL TQ for *Hexagrammos otakii*, and the assessment scores for contaminated sediments.

Table 3. Maximal possible values of NOEL TQ for *Hexagrammos otakii* at 5 hypothetical marine contaminated sediments

Hazardous chemical	Hypothetical marine contaminated sediment				
	A	B	C	D	E
As	0,23	0,26	0,25	0,32	0,5
Chlordane	0,059	0,16	0,17	0,02	0,11
DDT	0,19	0,028	0,0028	0,2	0,087
PCB	0,21	0,27	0,51	1	0,46
Sum	0,69	0,72	0,93	1,54	1,16

4.2. 인체

이 5개 가상오염퇴적물이 존재하는 해역에 서식하는 쥐노래미에 축적된 오염물질에 대한 개인별 노출평가는 물고기에 포함된 오염물질의 함량, 해당 물고기 섭취량, 체중에 근거하여 다음 식에 의해 계산된다.

어류섭취에 의한 개인별노출량(mg/kg/day)

$$= \frac{\text{어류체내 오염물질농도(mg/kg)} \times \text{일평균섭취량(kg/day)}}{\text{체중(kg)}} \quad (4)$$

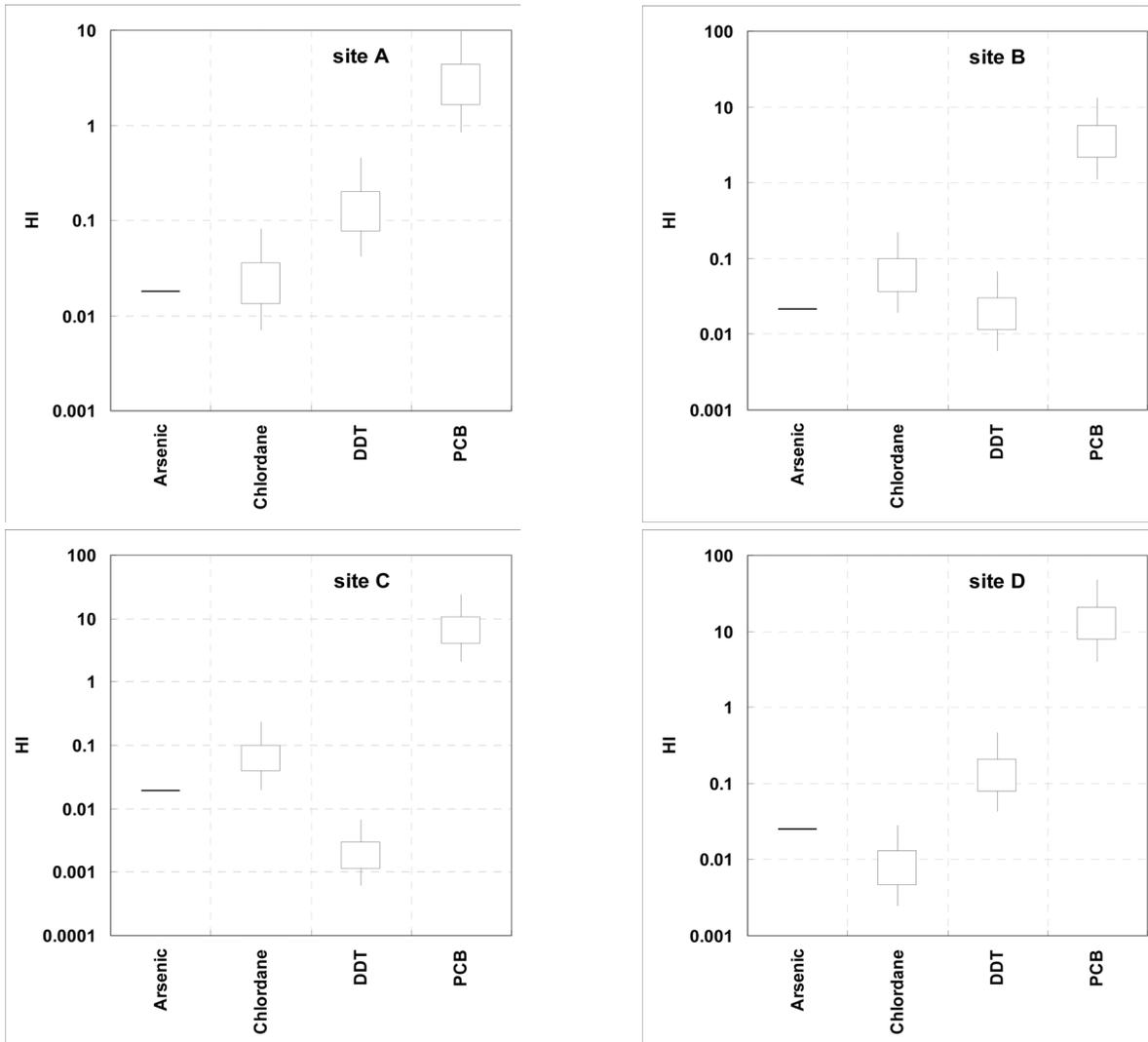
TrophicTrace®에서는 인체건강에 대해 비발암위험과 발암위험을 평가하는데 이를 활용하여 5개 가상퇴적물의 영향을 비교하였다. 비발암위험지수(hazard index, HI)는 다음 식과 같이 주어지며 이 지수가 1 이상이면 인체건강에 위험한 것을 뜻한다. 여기서는 5개 가상퇴적물로부터 오염물질을 농축한 쥐노래미를 체중 60 kg 성인이 한번에 227 g (1 온스)씩 한 달에 4회 섭취할 때의 위험지수를 계산하였다.²⁶⁾ 참고로 우리나라 성인 1인의 어패류 일일 섭취량은 111.29

g이고, 이중 어류가 57.45 g, 패류가 53.48 g으로 보고되어 있다.³⁰⁾ 그러므로 실제 우리나라 인구는 오염퇴적물의 영향에 매우 취약할 것으로 사료된다.³¹⁾ 우리나라 성인의 전체 어류섭취량중 쥐노래미가 차지하는 비율은 아직알려져 있지 않고, 또한 지역에 따라 다르므로 이번 평가에서는 섭취된 모든 어류가 쥐노래미라고 가정하였다. 따라서 아래의 계산결과는 이러한 가정에 따른 것이다.

$$\text{비발암위험지수(HI)} = \frac{\text{개인별노출량(mg/kg/day)}}{\text{기준노출량(mg/kg/day)}} \quad (5)$$

TrophicTrace®에 의해 계산된 비발암위험지수(HI) 값은 Table 5와 Fig. 3에 정리하였다.

5개 가상퇴적물 모두에서 PCB는 HI 값이 9.8~47.1로 1 보다 높아 매우 위험한 것으로 나타났다. 한편 DDT는 HI 값이 0.007~0.460으로 5개 가상퇴적물에서 각기 다른 값을 보이나 모두 1 이하로 위험도가 상대적으로 낮은 편이었다. Chlordane의 HI 값은 0.028~0.020였고, As의 HI 값은 0.018~0.039로 낮게 나타났다. 유해화학물질정화지수가 8로 동일



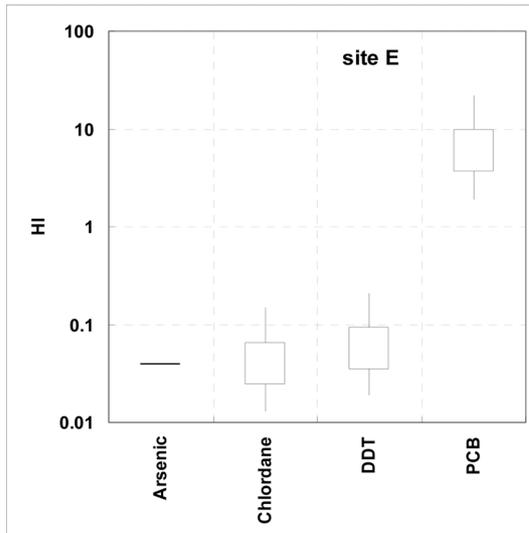


Fig. 3. Hazard indices (HI) for 5 hypothetical marine contaminated sediments.

Table 5. Maximal possible value of hazard indices (HI) for 5 hypothetical sediments

Hazardous chemical	Hypothetical marine contaminated sediment				
	A	B	C	D	E
As	0,018	0,021	0,019	0,025	0,039
Chlordane	0,081	0,220	0,230	0,028	0,150
DDT	0,460	0,067	0,007	0,470	0,210
PCB	9,84	13,00	24,20	47,10	21,90

한 5개 가상퇴적물에서 비발암위험지수(HI)가 서로 매우 다르게 나타난 것은 각 오염물질별로 인체에 악영향을 미치는 정도가 서로 다르기 때문이다. 이는 앞서 어류에 대한 결과와 같다.

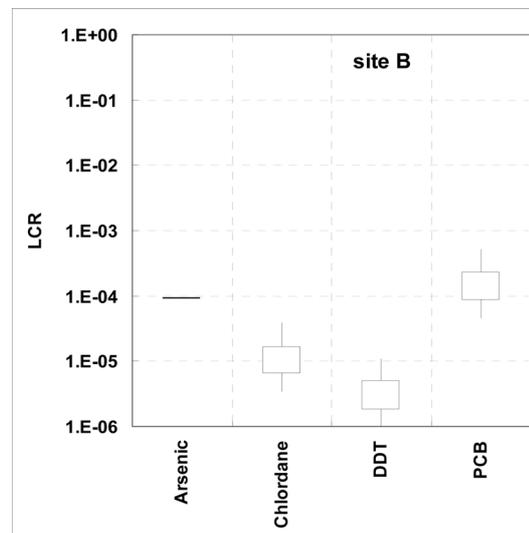
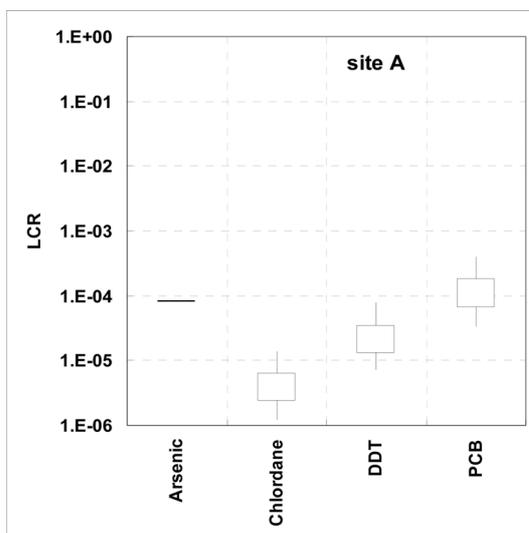
발암위험도는 발암잠재력(Cancer Slope Factor)×인체노출량으로 주어진다. 여기서는 체중 60kg인 사람이 70년간 노출되었을 때를 가정하였다.²⁶⁾ TrophicTrace®에 의해 계산된 발암위험도 값은 Table 6과 Fig. 4에 정리하였다. 발암물

Table 6. Maximal possible value of incremental Lifetime Cancer Risk (LCR) for 5 hypothetical marine contaminated sediments (numbers in Table : LCR×10⁵)

Hazardous chemical	Hypothetical marine contaminated sediment				
	A	B	C	D	E
As	8,1	9,3	8,7	11,0	18,0
Chlordane	1,4	3,9	4,0	0,49	2,6
DDT	7,8	1,1	0,11	8,0	3,5
PCB	39	52	97	190	88

질의 허용위험도(Acceptable Risk Level, ARL)는 10⁻⁵으로 하여 오염물질의 영향을 판단하였다.³²⁾

Table 6에서 볼 수 있는 바와 같이 PCB의 발암위험도는 5개 퇴적물에서 39~190×10⁻⁵으로 높게 나타났다. DDT의 발암위험도는 5개 퇴적물에서 0.11~8.0으로 높게 나타났고 Chlordane의 경우 0.49~4.0의 높은 값을 보였다. DDT와 Chlordane의 경우 비발암위험지수가 모든 퇴적물에서 1 이하로



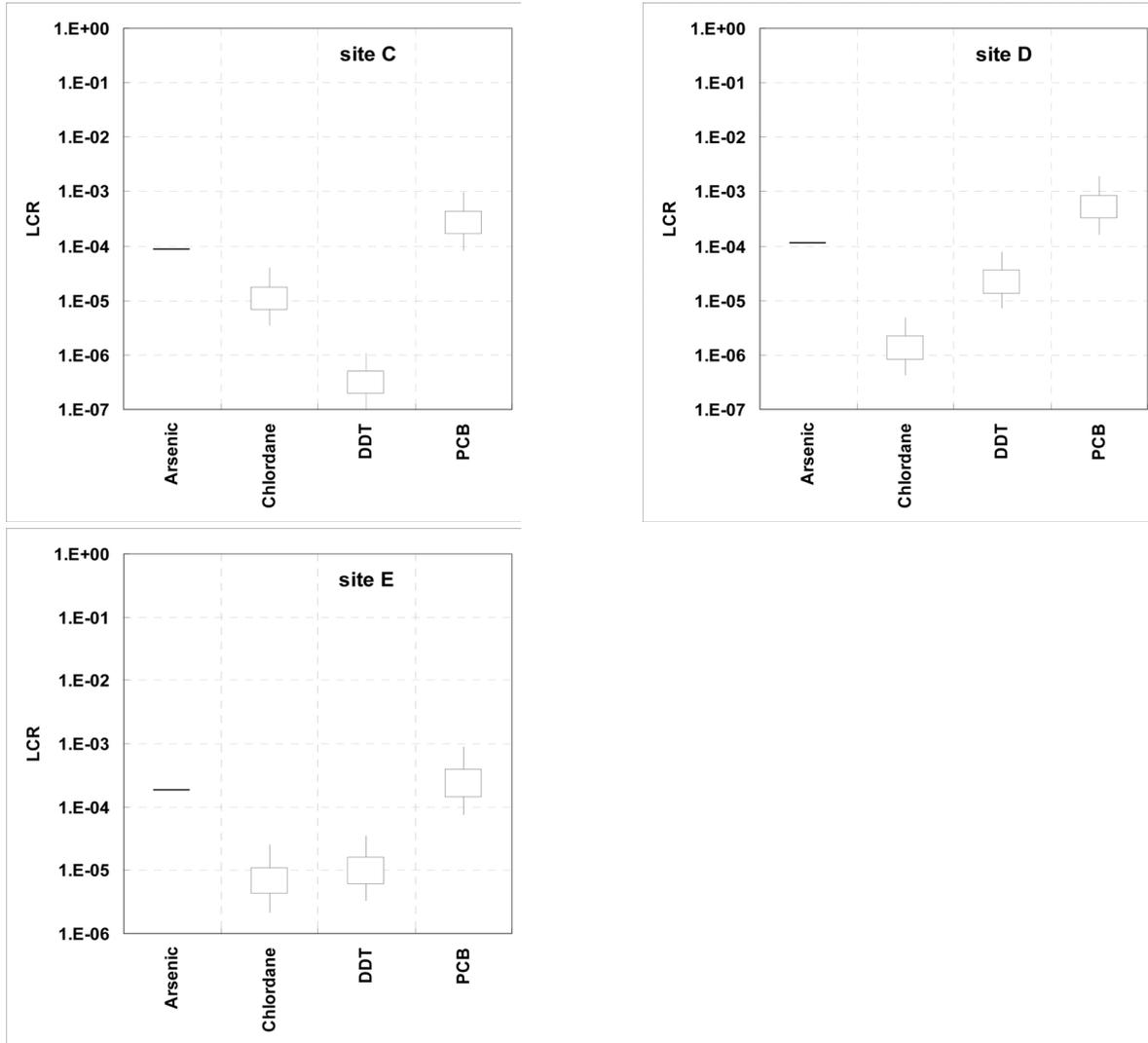


Fig. 4. Incremental Lifetime Cancer Risk for 5 hypothetical marine contaminated sediments.

나타났으나 발암위험도는 한 곳씩을 제외하고는 모두 1×10^{-5} 이상을 보여 발암가능성 있는 것으로 나타났다. As의 경우 5개 퇴적물에서 비발암위험지수가 0.018~0.039로 매우 낮았으나 발암위험도는 $8.1 \sim 18.0 \times 10^{-5}$ 으로 높게 나타나 As는 발암이외의 위험보다는 발암에 의한 위험이 더 큰 물질인 것으로 나타났다. 비발암위험지수(HI)의 경우와 마찬가지로 발암위험도는 5개 가상퇴적물에서 매우 다르게 나타났다는데 이는 각 오염물질별로 인체에 악영향을 미치는 정도가 서로 다르기 때문이다.

5. 실효역 적용가능성 검토

유해화학물질 정화지수(CI_{HC})는 여러 가지 오염물질들이 동시에 존재하는 해양오염퇴적물의 정화복원의 우선순위를 결정하기 위한 퇴적물관리 도구이다. 그러나 이 지수는 오염퇴적물이 존재하는 해역에 서식하는 무척추 동물 이외의 표영생물(예, 어류)과 인간에 대한 위험을 고려하지 못하기

때문에, 이들에 대한 위험을 평가할 필요가 있다. 특히 해양별 영양전이 단계에서 군집 변수의 불균일성(예, 체중, 지방함량, 먹이선호도 등)과 이들 군집 변수의 측정오차는 위험평가를 위한 계산과정에서 발생하게 된다.³³⁾ 또 생태 및 인간 위험 평가에 수반되는 불확실성과 변이는 환경에 영향을 미치는 사업의 추진방법과 시기 결정에 별도로 영향을 미친다.³⁴⁻³⁶⁾ 오염물질의 먹이그물 간의 이동에서의 불확실성과 변동성을 정량적으로 평가하는 작업은 생태 위해성 산정의 신뢰성을 보장해 준다. *TrophicTrace*® 모형은 해저 퇴적물의 오염물질 및 유기물탄소 함량, 대상 어류로 연결되는 먹이 그물 개념 모형 등 극히 제한된 정보에 의거하여 해저퇴적물에 함유된 오염물질에 노출되는 저서 어류와 인간에 대한 위험을 평가해 주는 편리한 도구이다. 이 모형에서는 유기오염물의 경우에는 비교적 영양단계별 이동을 충실하게 고려하고 있으나, 산화-환원 반응이나 산-염기 반응을 고려하지 못하므로 금속에 대한 생태 및 인간 위험 평가에 불확실성이 내재되어있는 것으로 사료된다. 그러나 해역의 준설, 준설퇴적물의 해양 처분이나 인공습지 조성

등의 해저퇴적물 사업의 관리 도구로서 사용하기에는 비용 효과적으로 판단된다. 한편 이 모델을 사용하여 오염퇴적물이 존재하는 실해역 서식 어류에 대한 위해성을 정밀하게 평가하기 위해서는, 해수 중 오염물질 농도를 직접 측정할 값의 범위를 입력하는 것이 바람직하며 각 생물체의 지방성분비율도 그 지역에서 채취한 개체의 것을 입력하는 것이 좋다. 이 모델에서는 점추정 대신 사다리꼴 퍼지숫자를 이용한 구간추정을 하기 때문에 상당히 불확실성에 대한 고려를 하고 있지만 주어진 퇴적물의 생태위험평가의 신뢰성을 제고하기 위해서는, 실해역의 관리 대상 생물에 대해 개념모형을 상세히 구성하고, 각 주요 영양단계 참여 생물, 해수, 해저 퇴적물의 오염물질 함량을 시공간적으로 정밀하게 조사해야 할 것으로 사료된다.

6. 결론

많은 오염물질들이 유입되어 분포하고 여러 가지 연안과정에 의해 연안생태계에 전이되는 오염물질의 특성상 유해화학물질의 생태계 영향을 종합적으로 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 지금까지의 많은 연구는 한가지 오염물질에 대해 한 종류의 생물이 어떻게 영향을 받을 것인가에 대해 이루어졌다. 따라서 여러 가지 오염물질들이 동시에 퇴적물에 존재할 때 어떠한 영향을 받을 것인가에 대해서는 쉽게 평가방법을 제시하기 어렵다. 해양오염퇴적물의 정화복원을 위한 유해화학물질 정화지수를 설정한 것은 이처럼 복잡한 해양환경에서 가장 합리적인 관리대안을 도출하기 위한 것이다. 본 연구에서 해양오염퇴적물질 관리용 유해화학물질 정화지수는 같으나 유해물질 함량이 다른 5개의 가상 오염퇴적물이 보이는 생물위험은 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 쥐노래미에 대한 NOEL TQ의 합계와 LOEL TQ의 합계는 5개 가상 오염퇴적물에서 약 2배 이상의 차이가 났다. 이는 해양오염퇴적물 특성규명에 사용된 제1, 제2기준이 어류 종별 및 오염물질별 영향을 고려하지 않기 때문이다. 5개 가상 오염퇴적물에서 PCB의 경우 인체에 대한 비발암위험지수(HI) 값은 9.8~47.1, 발암위험도는 $39\sim 190\times 10^{-5}$ 의 범위를 보였다. 이와 같이 비발암위험지수(HI) 및 발암위험도가 서로 매우 다르게 나타난 것은 각 오염물질별로 인체에 악영향을 미치는 정도가 다르기 때문이다. 이 모델의 일차적인 결과는 유해화학물질 정화지수가 같더라도 어느 지역이 더 준설을 먼저 해야 하는가에 대한 우선순위를 결정할 때 유용하게 사용될 수 있을 것으로 본다. 그러나 여러 가지 오염물질들이 복합적으로 존재하고 지역 마다 생태계의 구조에 차이가 있는 연안환경에서 인체 위험을 효과적으로 평가하기 위해서는 인간을 포함한 생태계의 종합적인 위해성을 조사할 필요가 있다. 준설이나 해양투기 등 해저퇴적물 관리에 필요한 해저퇴적물의 생태 및 인간 위험을 일차적으로 평가하는 데에는 영양단계를 고려하는 생태위해성 모델인 TrophicTrace® 모형

의 운용이 매우 비용-효율적인 수단이라고 생각된다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원에서 이루어졌습니다.

KSEE

참고문헌

- Hong, G. H., Park, Y. A. and Lee, K. W., "Partitioning of heavy metals in sediments from Jinhae Bay, Korea," *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **18**, 100~104(1983).
- Hong, G. H., Kim, S. H., Suedel, B. C., Clarke, J. U. and Kim, J., "A Decision-Analysis Approach for Contaminated Dredged Material Management in South Korea," *Integrated Environmental Assessment and Management*, **6**, 72~82(2010).
- Hong, G. H., Kim, S. H. and Yang, D. B., "Countrywide characterization of contaminated sediments and prioritization for administrative intervention in South Korea," (submitted as book chapter, Bridges, T. and Moore, D. (Eds.) *Strategies for Sustainable Sediment Management*, Wiley Inter Science in preparation), (2010).
- Choi, K. Y., Kim, S. H., Hong, G. H. and Chon, H. T., "Distributions of heavy metals in the South Korean harbor sediments," *Environmental Geochemistry and Health in Asia Pacific Region*, (submitted) (2010).
- Yang, D. B., "On the pollution caused by organic materials in Chinhae Bay, Korea," *Chem. and Ecol.*, **6**, 95~107 (1992).
- Yang, D. B. and Hong, G. H., "Nutrients and chlorophyll a variations at a fixed station during the red tides in Jinhae Bay," *J. Oceanogr. Soc. Korea*, **17**, 19~26(1982).
- Hong, G. H., Yang, D. B. and Lee, K. W., "Nutrients and trace metals in permanently well-mixed coastal waters of Korea," *J. Oceanogr.*, **23**, 159~168(1988).
- Hong, G. H., Kim, S. H., Yang, D. B. and Lim, G. H., "Atmospheric input of trace metals over the Yellow Sea: Shipboard results," April 1995. In Hong, G. H., Zhang, J. and Park, B. K. (eds.). *Health of the Yellow Sea*. 211~236. The Earth Love Publication Association, Seoul(1998).
- Kim, W. S., Yoon, S. J. and Yang, D. B., "Effects of chlorpyrifos on the endogenous rhythm of the Manila clam, *Ruditapes philippinarum* (Bivalvia: Veneridae)," *Mar. Pollut. Bull.*, **48**, 182~187(2004).
- Mozaffarian, D. and Rimm, E. B., "Fish intake, contaminants, and human health," *Journal of the American Medical Association*, **296**, 1885~1899(2006).
- 해양환경관리법시행규칙, 국토해양부령 제300호, 2010.10.15 개정.
- United States Environmental Protection Agency and United States Army Corps of Engineers (USEPA/USACE). Evaluation of dredged material proposed for ocean disposal:

- testing manual. EPA-503/8-91/001. pp. 1~214(1991).
13. United States Environmental Protection Agency and United States Army Corps of Engineers (USEPA/USACE). Evaluation of dredged material proposed discharge in waters of the U.S. testing manual: inland testing manual. EPA 823-B-98-004, pp. 1~176(1998).
 14. McFarland, V. F., "Activity-based evaluation of potential bioaccumulation from sediments," in *Proceedings of the Conference Dredging '84*, Clearwater Beach, FL, U.S.A., American Society of Civil Engineers, New York, pp. 461~467(1994).
 15. Suedel, B. C., Boraczek, J. A., Peddicord, R. K., Clifford, P. A. and Dillon, T. M., "Trophic transfer and biomagnification potential of contaminants in aquatic ecosystems," *Rev. Environ. Contam. Toxicol.*, **136**, 21~89(1994).
 16. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Proposed changes to the bioaccumulation testing evaluation framework and response to scientific peer reviewers comments on the existing framework for determining the suitability of dredged material to be placed at the Historic Area Remediation Site (HARS). USEPA, Region 2, New York (2000).
 17. Hong, S. H., Yim, U. H., Shim, W. J., Li, D. H. and Oh, J. R., "Nationwide monitoring of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments from coastal environment of Korea," *Chemosphere*, **64**, 1479~1488(2006).
 18. Kwak, S. N., Baeck, G. W. and Klump, D. W., "Comparative feeding ecology of two sympatric greenling species, *Hexagrammos otakii* and *Hexagrammos agrammus* in eelgrass *Zostera marina* beds," *Environ. Biol. Fishes*, **74**, 129~140(2005).
 19. Burger, J., Gochfeld, M., Jeitner, C., Burke, S. and Stamm, T. "Metal levels in flathead sole (*Hippoglossoides elassodon*) and great sculpin (*Myoxocephalus polyacanthocephalus*) from Adak Island, Alaska: Potential risk to predators and fisherman," *Environ. Res.*, **103**, 62~69(2007).
 20. Suzuki, Y., Nakamura, R., Nakahara, M. and Ueda, T., "Radionuclide-binding proteins in the liver of greenling *Hexagrammos otakii*," *Bulletin of the Japanese Scientific Fisheries*, **52**, 139~145(1986).
 21. Moon, H. B. and Ok, G., "Dietary intake of PCDDs, PCDFs and dioxin-like PCBs, due to the consumption of various marine organisms from Korea," *Chemosphere*, **62**, 1142~1152(2006).
 22. 김종관, 강용주, "취노래미, *Hexagrammos otakii*의 위내용물 분석," *J. Korean Fish. Soc.*, **30**(3), 432~441(1997).
 23. Anchor Environmental, CA L.P. Draft feasibility study and alternatives evaluation - Rhine Channel sediment remediation Newport Bay, California. Report submitted to Orange County Coastkeeper, California Regional Water Quality Control Board, pp. 1~68(2005).
 24. Cura, J. J., Heiger-Bernays, W., Bridges, T. S. and Moore, D. W., "Ecological and human health risk assessment guidance for aquatic environments," Technical Report DOER-4, US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Dredging Operations and Environmental Research Program, pp. 1~105(1999).
 25. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Partition Coefficients for Metals in Surface Water, Soil, and Waste. Prepared by HydroGeoLogic, Inc., and Allison Geoscience Consultants, Inc. for the Office of Solid Waste, pp. 1~93(1999).
 26. Stackelberg, von K. and Bridges, T. S., "A management guide for a tiered risk assessment procedure for evaluating bioaccumulation data collected during regulatory evaluations of dredged material. Menzie-Cura & Associates, Inc. and US Engineer and Development Research Center, pp. 1~31(2002).
 27. U.S. Army Corps of Engineers, BSAF Database <http://el.erdc.usace.army.mil/bsafnew/>
 28. Gobas, F. A. P. C., "A model for predicting the bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in aquatic food-webs: application to Lake Ontario," *Ecol. Modelling*, **69**, 1~17(1993).
 29. Gobas, F. A. P. C., Z'Graggen, M. N. and Zhang, X., "Time response of the Lake Ontario ecosystem to virtual elimination of PCBs," *Environ. Sci. Technol.*, **29**(8), 2038~2046(1995).
 30. 황윤재, 2007년도 식품수급표, 한국농촌경제연구원, pp. 1~287(2008).
 31. Yang, D. B. and Hong, G. H., "Human health risk associated with seafood consumption in S. Korea" (in preparation) (2010).
 32. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories, Volume 2 Risk Assessment and Fish Consumption Limits, Third Edition, EPA 823-B-00-008, pp 1~383(2000).
 33. Linkov, I., Stackelberg von K., Burmistrov, D. and Bridges, T. S., "Uncertainty and variability in risk from trophic transfer of contaminants in dredged sediments," *The Science of the Total Environment*, **274**, 255~269(2001).
 34. Thompson, K. M. and Graham, J. D., "Going beyond the single number: using probabilistic risk assessment to improve risk management," *Human Ecol Risk Assess*, **2**(4), 1008~1034(1996).
 35. Morgan, M. G. and Henrion, M. Uncertainty: A guide to dealing with quantitative risk and policy analysis. New York, NY: Cambridge University Press(1990).
 36. Stackelberg, von K., Vorhees, D., Linkov, I., Burmistrov, D. and Bridges, T. S., "Importance of uncertainty and variability to predicted risks from trophic transfer of contaminants in dredged sediments," *Risk Analysis*, **22**(3), 499~512(2002).