

# 중금속 오염 준설토의 토양으로서의 유효활용을 위한 선별수준 생태위해도평가 Screening-Level Ecological Risk Assessment for Beneficial Reuse as Soil of Dredged Sediment Contaminated with Heavy Metals

김문경 · 김기범 · 최용주 · 남경필<sup>†</sup>  
Moonkyung Kim · Kibeum Kim · Yongju Choi · Kyoungphile Nam<sup>†</sup>

서울대학교 건설환경공학부  
Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

(Received November 16, 2015; Revised January 12, 2016; Accepted March 31, 2016)

**Abstract :** This study conducted a screening-level ecological risk assessment for heavy metals in dredged sediment for recycling in terrestrial environment. Toxicological information of six heavy metals (i.e., Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, and Ni) was collected from ECOTOX of US Environmental Protection Agency, and screened and qualified for the use in the screening-level ecological risk assessment. According to the number of terrestrial ecological receptors for which toxicological information is available, PNEC (Predicted No Effect Concentration) of each heavy metal was derived using either stochastic approach (for Cu, Zn, and Cd), or deterministic approach (for Pb, Cr, and Ni). Hazard quotients of the six heavy metals were derived for a field-collected dredged sediment using the PNEC derived and the PEC (Predicted Environmental Concentration) determined for the dredged sediment. The HQs of Cu, Zn, Cr, Pb and Ni were higher than unity indicating a possibility of ecological risk of the five heavy metals when the dredged sediment is applied in terrestrial environment. Accordingly, remediation processes or a higher-level ecological risk assessment would be needed for the recycling of the material.

**Key Words :** Screening-level Ecological Risk Assessment, Heavy Metal Contamination, Sediment, Beneficial Reuse of Sediment

**요약 :** 본 연구에서는 중금속의 생태독성자료를 통해 준설토의 육상 재활용을 위한 screening-level 생태위해도 평가를 수행하였다. 대상 중금속 6종(Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)의 독성자료는 USEPA의 ECOTOX를 통해 수집하였으며, 선별과정을 거쳐 생태위해도 평가에 사용하였다. 각 중금속의 예측무영향농도는 독성자료의 획득이 가능한 육상 수용체의 종 수에 따라 확률론적 방법(Cu, Zn, Cd)과 결정론적 방법(Pb, Cr, Ni)을 통해 도출하였다. 현장 채취 준설토에서 발견되는 중금속 실제오염농도와 예측무영향농도와의 비고를 통해 생태위해도를 계산하였으며 Cu, Zn, Cr, Pb, Ni의 위해도가 1을 초과하여 생태독성학적 위해도가 존재할 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서 재활용 부지의 생태위해도를 고려하였을 때 해당 중금속 오염 준설토를 활용하기 위해서는 중금속 정화 또는 보다 높은 수준의 생태 위해도평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

**주제어 :** 생태위해도 평가, 중금속 오염, 준설토, 준설토의 유효활용

## 1. 서론

항만개발 및 해상항로 유지보수로 인해 해마다 약 3,000만 m<sup>3</sup> 정도의 준설토가 발생하고 있다.<sup>1)</sup> 이로 인해 발생하는 준설토는 기존에 해양투기 및 해안매립장 처리와 같은 단순한 방법에만 의존해왔으나 런던협약 '96 의정서'가 발효됨에 따라 해양배출 제한으로 인해 준설토의 유효활용이 점차 중요해지고 있다.<sup>1)</sup> 준설토의 유효활용이 잘 이루어지지 않는 국내와 달리 해외의 경우 단순 투기 및 매립보다는 신기술 및 신공법의 개발 및 적용으로 준설토가 건설재료 및 서식지 조성 등<sup>2)</sup>으로 활용도가 높은 귀중한 자원으로 활용되고 있다.

준설토는 일반적으로 유기물, 영양염류 및 중금속 등으로 오염되어 있는 것으로 판단된다.<sup>3)</sup> 특히 중금속으로 오염된 준설토를 유효활용할 경우 준설토에 존재하는 중금속은 주변 생물들의 성장을 저해하는 독성영향을 끼쳐 장기적으로 생태계에 악영향을 미칠 수 있으며<sup>4)</sup> 유류 오염과는

다르게 중금속은 생물학적, 화학적으로 분해가 거의 일어나지 않기 때문에 중금속이 오염된 준설토가 육상 환경에 재활용될 때에는 토양 생태계와 농작물의 오염으로 직결될 수 있다. 토양 내 중금속이 과량 오염된 경우 각 중금속 자체의 독성효과와 함께 다른 영양소의 결핍을 유발할 수 있으므로 생태독성에 대한 고려가 선행되어야 한다. 국내에서는 준설토의 유효활용을 위해 준설토 내 중금속 농도 및 용출률을 토대로 한 해양 준설토사 처리 및 유효활용 기준<sup>4)</sup>이 수립되어 있으며, 준설토가 토양으로 최종 이용되는 경우 해양 기준은 적합한 기준이라 보기 어려우므로 토양오염 우려기준이 적용되고 있으나, 육상 생태수용체에 대한 고려는 충분히 이루어지지 못하는 실정이다. 본 연구는 따라서 오염도 기준으로 토양오염 우려기준을 적용함과 더불어 추가적으로 생태수용체를 고려한 생태위해도평가도 필요하다고 판단된다.

Screening-level 생태위해도평가는 생태학적 수용체가 대상 오염물질에 노출되었을 때 발생할 수 있는 독성 영향을

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: kpnam@snu.ac.kr Tel: 02-880-1448 Fax: 02-873-2684

평가하는 과정이다. 생태위해도평가 과정에서는 독성물질에 대한 생태학적 수용체의 민감도가 다르다는 것에 근거하여 다양한 민감도를 확률론적으로 나타낸 중민감도분포를 활용하거나, 자료의 수가 부족하여 중민감도분포를 도출할 수 없을 때 AF (Assessment Factor)를 이용하여 결정론적 방법을 사용할 수 있다. 토양수용체에 대한 독성자료가 존재하지 않는 경우 equilibrium partitioning method를 사용하여 수생태계에 대한 독성자료를 환산하여 사용할 수 있으나 이는 신뢰도가 매우 낮으므로 사용을 권장하지 않는다.<sup>5)</sup> 미국, 네델란드, 캐나다, 유럽연합 등에서는 screening-level 생태위해도평가 지침을 마련하여 환경기준 설정에 screening-level 생태위해도평가를 적용하고 있으며,<sup>6)</sup> 중금속 오염 준설토를 대상으로한 생태위해도평가와 관련된 연구도 진행되고 있다. Junhong<sup>7)</sup>에서는 중국 Yilong Lake 준설토의 생태위해도를 평가하기 위하여 각 중금속이 담수 생태계에 미치는 독성영향을 고려하여 도출된 준설토 환경기준과 현장의 중금속 발견농도를 비교하였다. 그러나 준설토를 대상으로 시행된 screening-level 생태위해도평가는 대부분 수생태계에 한정되어있으며, 국내의 경우 외국의 방법을 벤치마킹하여 screening-level 생태위해도평가를 시행하고 이를 통해 생태준거치를 설정하고 있으나 이 또한 수생태계에 한정되어있으므로, 토양으로서의 유효활용을 위해서는 토양생태계에 대한 고려도 필요하다고 판단된다.

생태수용체를 고려한 생태독성학적 위해도 평가 방법론의 개발과 국내 자체적으로 생산한 생태독성 자료의 부족으로 국내 생물종에 대해 생태독성을 기반으로 한 준설토 활용 기준을 마련하기는 어려운 실정이므로 본 연구에서는 screening-level의 생태위해도 평가를 위한 미국, 캐나다 등의 자료선별 및 도출과정을 준용하여 준설토의 육상 환경재활용을 위한 중금속의 생태독성학적 허용농도를 제안하였다. 허용농도 도출을 위한 독성자료는 USEPA (US Environmental Protection Agency)의 ECOTOX (ECOTOXicology knowledgebase)와 문헌자료를 조사, 분석하여 획득하였으며, 도출된 6종 중금속(Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)의 허용농도를 이용, 현장 채취 준설토의 생태위해도를 평가하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 대상 준설토 및 분석

울산 장생포항에서 채취한 준설토를 풍건 후 2 mm 체로 체거름하여 준설토 내 중금속 함량을 분석하기 위한 시료로 사용하였다. 중금속 추출법인 US EPA 3051A<sup>8)</sup>의 절차에 따라 용기에 시료 0.5 g 시료와 질산(HNO<sub>3</sub>) 10 mL을 넣고 175°C에서 10분 간 microwave를 이용해 산분해 하였다. 산분해 과정 후 여과한 용액을 시료로 이용하여 Therom사 Trace 1310로 중금속 6종(Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)을 분석하였다. 이때 중금속 중 Cr는 총 Cr 농도 및 Cr<sup>6+</sup>의 농도의 분석이 가능하나, Cr<sup>6+</sup>에 특정한 생태독성 자료가 충분하지

못하여 본 연구에서는 총 Cr 농도만을 분석 및 위해도 평가 대상으로 선정하였다.

### 2.2. 생태독성학적 자료 조사 및 대표값 선정

중금속 오염 준설토의 육상활용 시 생태독성학적 허용농도 산정을 위한 자료 조사 및 대표값 선정은 다음과 같은 절차로 진행하였다. 생태독성학 자료 수집 시 USEPA의 ECOTOX<sup>9)</sup>를 주요 자료로 사용하되, CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment),<sup>10)</sup> RIVM (National Institute for Public Health and the Environment)<sup>11)</sup> 등에 수록된 독성자료 또한 포함하였다. 토양 생태종에 대한 독성정보는 국내 및 국제 서식종과 국제 표준 시험종을 포함하였다.

ECOTOX Database 등을 통해 얻은 중금속 6종(Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)에 대한 독성종말점 값을 선별하기 위하여 본 연구에서는 네델란드에서 시행 중인 방법<sup>11)</sup>을 준용, 다음 조건을 적용하였다. 독성종말점 결정시 만성독성과 급성독성 중 만성독성 값만을 고려하며, 보고된 다양한 독성종말점(NOEC: No Observed Effect Concentration, LOEC: Lowest Observed Effect Concentration, ECx: Effect Concentration, ICx: Inhibition Concentration)중 NOEC 값을 우선적으로 사용하였다. NOEC 값이 10개 이상인 경우 NOEC 값만을 사용하였으며, 10개 미만인 경우 EC<sub>10</sub> (10% effect concentration) 값을 추가적으로 사용하였다. NOEC에서 얻은 결과는 모두 만성독성이므로 추가적인 확인이 필요하지 않으나 EC<sub>10</sub>의 경우 만성독성과 급성독성 값이 함께 포함되어 있기 때문에 각각의 값을 도출한 원저를 통해서 만성독성으로 분류된 결과값만을 이용하였다. 위의 단계에서 분류된 자료들은 원저를 통하여 공인시험방법(ISO: International Organization for Standardization, OECD: Organization for Economic Cooperation and Development method 등)으로 평가된 자료인지 확인하고, 공인시험방법이 적용된 경우 독성종말점 자료로 사용하였다. 원저를 통하여 공인시험방법의 적용 여부 확인이 불가능한 경우 배양 온도, 광주기, 3회 이상 반복 및 대조군 사용, 노출기간, 통계학적 처리, 유기물 함량의 6가지 조건이 모두 참고문헌에 명시된 경우에만 독성종말점 자료로 사용하였다.

각 종의 독성종말점 대표 평균농도 값을 구하기 위해 기하평균을 사용하였다. 자료 선별 단계에서 공인시험방법이 참고문헌에 제시되지 않는 경우에는 NOEC 또는 EC<sub>10</sub>의 정규화(Normalization) 과정이 필요하다. 정규화에 사용되는 식은 아래와 같다.<sup>5)</sup>

$$NOEC \text{ or } EC_{10(standard)} = \frac{Fom_{soil(standard)}(3.4\%)}{Fom_{soil(exp)}} \quad (1)$$

$Fom_{soil(standard)}$  : 표준 토양 내 유기물 함량(3.4%)

$Fom_{soil(exp)}$  : 독성실험에 사용된 토양 내 유기물함량

정규화 과정 후 각 대상 종에 대한 독성종말점(i.e., NOEC, EC<sub>10</sub>)이 하나 이상인 경우 해당 종의 기하평균값을 구하여 사용하였다.

### 2.3. 생태독성학적 허용농도 결정

토양의 생태독성을 평가하는 대상은 크게 식물, 무척추 동물, 미생물, 야생동물로 분류되나, RIVM<sup>10)</sup>의 제안에 따라 식물과 무척추 동물은 토양 내에 영향을 받는 수준이 흡사하다고 가정, 하나의 군으로 간주하였다. 따라서 수집된 독성종말점의 독성실험대상종에 따라 식물/무척추동물, 미생물, 야생동물 세가지 군으로 분류하였다. Table 1은 수집된 중금속에 대한 독성자료를 분류하여 나타낸 것이며, 본 논문의 대상물질인 중금속 6종 모두에 대하여 세가지 군 중 식물/무척추동물의 이외의 자료는 선별과정 중 제외되었다. 분류된 각종의 독성값을 사용하여 종민감도분포(Species Sensitivity Distribution, SSD)를 도출하였다.

종민감도분포는 대상 생태종에 대한 특정 오염물질의 생태학적 독성을 통계학적으로 나타낸다. 각각의 분류 군의 종민감도분포는 log-normal 분포를 사용하여 독성종말점 자료로부터 종민감도분포 곡선을 생성하는 프로그램인 ETX 2.1을 이용하여 도출하였다. 종민감도분포는 다양한 독성값을 누적분포함수로 표현한 후 통계적 외삽법을 통해 도출하는 것으로 생태독성학적 허용농도 결정 시 각 분류군(i.e., 식물/무척추동물, 미생물, 야생동물)에 최소 10개의 종에 대한 독성종말점이 존재하는 경우 사용하는 방법이며 하나의 대상물질에 대해 수집된 독성자료를 사용하여 종민감도분포를 도출한다. 종민감도분포에서 x축은 대상 오염물질의

농도이고, y축은 사용된 전체 종 중에서 주어진 농도에서 영향을 받는 종의 비율이다.<sup>12)</sup> 종민감도분포를 통해 목표하는 오염물질의 농도를 예상할 수 있으며 또한 오염물질의 특정 농도에서 영향을 받는 생태종의 비율을 산출할 수 있다.

토양생태종의 경우 세가지 군으로 분류된 기준으로 각 군의 종민감도분포를 작성하여 가장 보수적인 HC<sub>x</sub> 값을 선정하였다. 유해농도는 본 연구에서 HC<sub>5</sub> (Hazardous Concentration)로 지정하였으며 HC<sub>5</sub> 값이란 대상 생태종의 95%를 보호할 수 있는 오염물질의 농도를 의미한다. 보호하고자 하는 생태종의 비율은 부지, 경제 요건에 따라 변화할 수 있다.

각 분류군에 10개 이상의 종이 존재하지 않는 경우 종민감도분포를 도출할 수 없으므로 결정론적 방법을 사용한다. 결정론적 방법은 확률론적 접근법에 비해 불확실성이 크기 때문에, 불확실성을 줄이기 위해 더 보수적인 결과값이 도출된다. 결정론적 방법을 통해 HC<sub>50</sub>와 HC<sub>5</sub> 값을 구하는 방법은 Table 2와 같다.

Table 1. Number of collected toxicity data of terrestrial species after screening and qualification processes<sup>9)</sup>

	Contaminants	Trophic level	Values	Species
Collected toxicological data before qualification process	Cu	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	10,415	1,120
	Zn	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	10,429	1,134
	Cd	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	2,087	198
	Pb	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	2,067	205
	Cr	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	774	81
	Ni	Plant/Invertebrate/ Microbe/Wild animals	658	68
Collected toxicological data after qualification process	Cu	Plant/Invertebrate	23	19
	Zn	Plant/Invertebrate	16	13
	Cd	Plant/Invertebrate	14	12
	Pb	Plant/Invertebrate	7	7
	Cr	Plant/Invertebrate	2	2
	Ni	Plant/Invertebrate	7	5

Table 2. Assessment factor method for the derivation of HC<sub>50</sub> and HC<sub>5</sub><sup>11)</sup>

Derivation of HC <sub>50</sub>	
Quality of data	Derivation methodology
Short-term toxicity test (s)	Minimum of Geometric mean of LC <sub>50</sub> /10 and calculated concentration using EqP*
NOEC (or EC <sub>10</sub> ) for one long-term toxicity test	Minimum of NOEC, geometric mean of acute toxicity value/10 and calculated concentration using EqP*
NOEC (or EC <sub>10</sub> ) for additional long-term toxicity tests of two trophic levels	Geometric mean of NOECs
NOEC for at least 4 long-term toxicity tests (distribution of NOECs is log-normal distribution)	Mean of log-normal distribution using NOECs
NOEC for at least 4 long-term toxicity tests (distribution of NOECs is not log-normal distribution)	Geometric mean of NOECs
Derivation of HC <sub>5</sub>	
Quality of data	Derivation methodology
No data	Calculated concentration using EqP*
Short-term toxicity test (s)	Minimum of LC <sub>50</sub> /1000
NOEC (or EC <sub>10</sub> ) for one long-term toxicity test	NOEC (or EC <sub>10</sub> )/100
NOEC (or EC <sub>10</sub> ) for additional long-term toxicity tests of two trophic levels	Minimum of NOEC (or EC <sub>10</sub> )/50
NOEC (or EC <sub>10</sub> ) for 3-9 long-term toxicity tests of three trophic levels	Minimum of NOEC (or EC <sub>10</sub> )/10

\* Equilibrium partitioning method

### 2.4. 생태위해도 결정

예측무영향농도(Predicted No Effect Concentration, PNEC)는 경우에 따라 HC<sub>5</sub> 값 또는 HC<sub>50</sub> 값이 될 수 있으나 본 연구에서는 예측무영향농도를 Swartjes 등<sup>13)</sup>에 따라 종민감도분포에서 HC<sub>5</sub>와 HC<sub>50</sub> 값을 얻은 후 HC<sub>5</sub>/UF와 HC<sub>50</sub>의 기하평균을 계산, 이를 생태독성학적 허용농도로 결정하였다. 이때 사용되는 UF (Uncertainty factor)는 전문가의 판단을 통해 1-5 값을 사용할 수 있으며 UF 값이 5일 때 가장 보수적인 결과를 얻게 된다. 이 때 계산된 기하평균값은 UF에 따라 달라지게 되는데 본 연구에서는 최소(UF = 5), 최대(UF = 1)의 범위로 제시하였고, 이를 각 중금속의 생태독성학적 허용농도 값의 범위로 결정하였다.

생태독성학적 허용농도(PNEC)를 결정한 후 현장 발견농도(Predicted Environmental Concentration, PEC)와 식 (2)에 따라 위해도(Hazard Quotation, HQ)를 산정하여 대상 부지에서의 생태위해도를 평가 할 수 있다.

$$HQ = \frac{PEC}{PNEC} \quad (2)$$

계산된 HQ의 값이 1 이상인 경우, 대상 오염물질이 오염부지에 생태학적으로 위해가 있는 수준으로 오염되어 있다고 판단할 수 있다. 반면 HQ의 값이 1 이하인 경우, 대상 오염물질은 오염부지에 생태학적으로 심각한 위해가 없는 것으로 판단할 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 울산 해양 준설토의 오염도 조사결과

본 연구에서 사용한 현장 준설토 내 중금속 오염농도를 Table 3에 나타내었다. 울산 해양 준설토 내 농도를 준설토 사 처리 및 활용기준<sup>14)</sup>과 비교하였을 때, Cr은 기준을 초과하지 않았으나 Zn이 기준을 9.3배, Cu가 기준을 3.3배 초과하는 등 Cu, Zn, Cd, Pb, Ni이 기준을 초과하였다. 토양으

로서의 유효활용을 위해 토양오염 우려기준(1지역)과 비교한 결과, Cd, Pb, Ni은 기준을 초과하지 않았으나 Cr이 20.6배, Zn이 5.6배, Cu가 1.3배 기준을 초과하여 울산 해양 준설토를 토양으로서 유효활용하는 것이 현행 기준 상 부적합함을 나타내었다.

### 3.2. 중금속의 생태독성학적 허용농도

독성 자료를 수집, 선별한 결과 Cu, Zn, Cd은 10개 이상의 종이 존재하여 종민감도분포를 그려 HC<sub>5</sub>와 HC<sub>50</sub>값을 도출하였고, 각 종민감도분포는 Fig. 1에 나타내었다. 나머지 3개 중금속(i.e., Pb, Cr, Ni)은 독성자료의 수가 부족하여 종민감도분포를 도출할 수 없어 결정론적 방법을 사용하여 HC<sub>5</sub>와 HC<sub>50</sub> 값을 계산하였다. 여섯 종의 중금속에 대하여 도출한 HC<sub>5</sub> 값과 HC<sub>50</sub> 값, 그리고 UF = 5와 UF = 1를 각각 적용하여 계산한 HC<sub>5</sub>/UF와 HC<sub>50</sub>의 기하평균 값을 Table 4에 제시하였다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 UF = 5와 UF = 1 조건에서 산정한 기하평균 값을 예측무영향농도(PNEC) 또는 생태독성학적 허용농도의 범위로 결정하였다. 도출한 생태독성학적 허용농도는 각각 Cu 17.8-39.7 mg/kg, Zn 45.9-102.7 mg/kg, Cd 2.3-5.2 mg/kg, Pb 16.7-37.5 mg/kg, Cr 12.3-27.5 mg/kg, Ni 16.7-37.5 mg/kg로 나타났다. 도출한 생태독성학적 허용농도는 Cd가 6종 중 가장 낮게, Zn이 가장 높게 나타났다.

**Table 4.** Calculated PNEC using HC<sub>5</sub>, HC<sub>50</sub> values derived by either species sensitivity distributions (for Cu, Zn, and Cd) or assessment factor method (for Pb, Cr, and Ni)<sup>11)</sup> (unit : mg/kg)

	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni
Hazardous concentration protecting 95% of ecological receptors (HC <sub>5</sub> )	14.0	59.5	1.5	4.8	3.3	11.2
Hazardous concentrations protecting 50% of ecological receptors (HC <sub>50</sub> )	112.5	177.1	18.1	484.4	229.0	125.0
Predicted No Effect Concentration (PNEC) (UF: 1-5)	17.8-39.7	45.9-102.7	2.3-5.2	16.7-37.5	12.3-27.5	16.7-37.5

**Table 3.** Screening-level ecological risk assessment for dredged sediment collected from Ulsan Jangsaengpo Harbor (unit : mg/kg)

	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni
Beneficial reuse of dredged soil (Ministry of Oceans and Fisheries)	60	247.7	1.55	62	134	46
Worrisome level of contaminated soil (Ministry of environment)	Zone 1	150	300	4	200	5
	Zone 2	500	600	10	400	15
	Zone 3	2,000	2,000	60	700	40
Countermeasure standard of contaminated soil (Ministry of environment)	Zone 1	450	900	12	600	15
	Zone 2	1,500	1,800	30	1,200	45
	Zone 3	6,000	5,000	180	2,100	120
PEC (Predicted Environmental Concentration)	200.3	1,673.7	1.9	78.6	103.2	48.0
PNEC (Predicted No Effect Concentration) (UF: 1-5)	17.8-39.7	45.9-102.7	2.3-5.2	16.7-37.5	12.3-27.5	16.7-37.5
HQ (Hazard Quotient) (UF: 1-5)	5.05-11.3	16.3-36.5	0.37-0.83	2.10-4.71	3.75-8.40	1.28-2.87

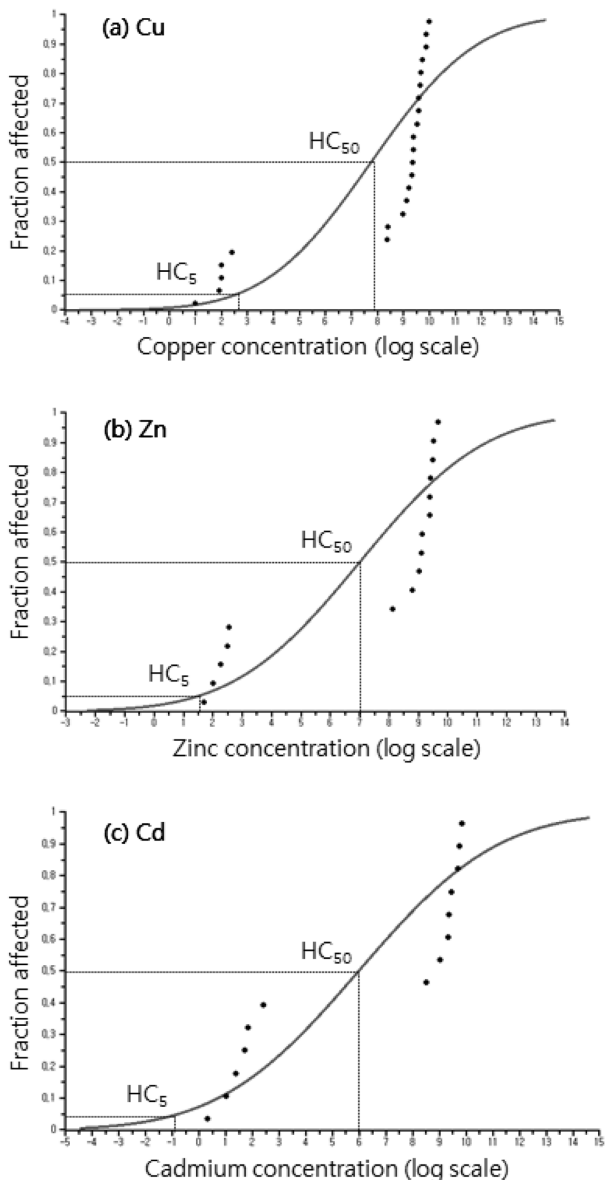


Fig. 1. Species sensitivity distributions of (a) Cu, (b) Zn and (c) Cd for the derivation of HC<sub>5</sub> and HC<sub>50</sub>.

### 3.3. 울산 해양 준설토의 생태독성학적 위해도 평가

생태수용체에 미치는 중금속의 독성을 고려한 생태독성학적 허용농도와 현장 채취준설토의 농도 비교를 통해 분석한 결과, 보수적인(UF = 5인 경우) 허용농도뿐 아니라 허용농도(UF = 1인 경우)에서도 Cu, Zn, Cr, Pb, Ni의 HQ가 1을 초과하여 생태위해도가 존재할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 특히 Zn은 HQ가 16.30-36.46으로 가장 높아 준설토 내 존재에 따른 생태학적 위해가능성이 상당한 것으로 평가되었다. Pb의 경우 오염농도가 78.6 mg/kg으로 토양오염 우려기준인 200 mg/kg보다 낮아 현행 기준을 만족하였으나, 생태독성학적 허용농도인 16.7-37.5 mg/kg을 초과하여 생태독성학적으로 위해를 미칠 수 있는 가능성을 확인하였다(HQ: 2.10-4.71). Ni 또한 토양오염 우려기준인 100 mg/kg을 초과하지 않아 현행 기준을 만족하나, 생태독

성학적 허용농도인 16.7-37.5 mg/kg을 초과하여 생태위해도가 존재할 가능성을 확인하였다(HQ: 1.28-2.87) (Table 3). 이와 같이 토양오염 우려기준과 본 연구에서 도출한 생태독성학적 허용농도는 상이하며, 따라서 현행 기준을 만족하더라도 준설토의 재활용 시 육상생태계에 생태독성학적 위해를 발생시킬 우려가 존재한다. 따라서 중금속 오염 준설토를 육상 환경에 유효활용할 경우 해당 환경의 생태수용체 보호를 위해서는 토양오염 우려기준과 더불어 본 연구에서 제시한 바와 같은 screening level의 생태위해도 평가도 필요할 것으로 사료되며, 이에 따라 유의한 생태위해도가 발견될 시에는 추가적으로 보다 엄밀한 생태위해성 평가를 실시하여 재활용을 위한 의사 결정에 반영하여야 할 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 중금속 오염 준설토의 육상 환경 유효 활용을 위하여 screening-level의 생태위해도 평가를 수행하였다. 국내 연구 및 자료의 부족으로 국내 생물종에 대한 평가는 수행하기 어려운 실정이므로, US EPA의 ECOTOX와 다양한 문헌으로부터 6종의 중금속(Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)에 대한 독성자료를 수집하였고 각 중금속에 대한 독성자료 분석을 통해 평가 및 도출한 중금속의 생태독성학적 허용농도(PNEC)를 제시하였다. 본 연구에서 제안된 생태독성학적 허용농도와 준설토사 처리 및 활용기준을 사용하여 울산 장생포항에서 채취한 준설토의 생태위해도를 평가한 결과, Pb와 Ni의 경우 토양오염 우려기준은 만족하나 생태위해도가 있을 가능성이 확인되었다. Cd을 제외한 다른 중금속의 생태위해도가 모두 1을 초과하는 것으로 나타나 해당 준설토의 유효활용을 위해서는 토양오염 우려기준을 고려하고 그와 동시에 보다 엄밀한 생태위해성 평가과정 또는 정화를 통한 중금속의 농도저감이 필요할 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지기술개발사업(GAIA)의 지원과 환경부의 폐자원에너지화 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

KSEE

## References

1. Kim, S. G., "Eco-friendly remediation technologies for beneficial reuse of marine dredged sediment," Korean Environmental Dredging Society, Ansan, Korea(2011).
2. Yoon, G. L., Lee, S. H., Shim, J. Y., Oh, M. H. and Kim, S. B., "Considering Beneficial Reuse of Dredged Materials in Korea," The Magazine of the Korean Society of Civil

- Engineers, Seoul, Korea(2015).
3. MOF, "Research of Development of assessment system for Ocean dumping of dredged sediment," Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 150~168(2003).
  4. Yoon, G. L. and Kim, H. S., "Use of Dredged Materials," Seoul, Korea. CIR(2011).
  5. Samantha, F., "Soil screening values for use in UK ecological risk assessment," Office of Soil Quality and Protection. Bristol(2004).
  6. Hope, B. K., "An Estimation of Ecological Risk Assessment and Management Practices," *Environ. Int.*, **32**(8), 983~995 (2006).
  7. Junhong, B., Baoshan, C., Bin, C., Kejiang, Z., Wei, D., Haifeng, G. and Rong, X., "Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from a Typical Plateau Lake Wetland, China," *Ecol. Modelling*, **222**(2), 301~306(2011).
  8. US EPA 3051A, "Method 3051a: Microwave assisted acid dissolution of sediments, sludges, soils, and oils," 2nd ed. Washington (DC), U.S. Gov. Print. Office(1997).
  9. US EPA, "ECOTOX User Guide: ECOTOXicology Database System," Version 4.0., Available: <http://www.epa.gov/ecotox/> (2014).
  10. CCME, "A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines," Canadian Council of Ministers of the Environment, ISBN-10 1-896997-45-7, Winnipeg, Manitoba, Canada(2006).
  11. RIVM, "Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of 'International and national environmental quality standards for substances in the Netherlands'," National Institute for Public Health and the Environment, Directorate for Chemicals, Waste and Radiation, Bilthoven(2007).
  12. Posthuma, L., Suter, W. G. and Traas, P. T., "Species Sensitivity Distribution in Ecotoxicology," CRC Press(2002).
  13. Swartjes, F. A., Rutgers, J. P. A., Janssen, P. J. C. M., Otte, P. F., Wintersen, A., Brand, E. and Posthuma, L., "State of the art of contaminated site management in The Netherlands: Policy framework and risk assessment tools," *Sci. Total Environ.*, pp. 427~428(2012).
  14. MOF, "Criteria of beneficial reuse and remediation for dredged sediment," Ministry of Oceans and Fisheries, p. 31(2007).