

## 납과 비소에 대한 환경매체별 생태위해성평가

이병우 · 이병천 · 김필제 · 윤효정<sup>†</sup>

국립환경과학원 환경건강연구부 위해성평가연구과

### Ecological Risk Assessment of Lead and Arsenic by Environmental Media

Byeongwoo Lee, Byoungcheun Lee, Pilje Kim, and Hyojung Yoon<sup>†</sup>

*Risk Assessment Division, Environmental Health Research Department,  
National Institute of Environmental Research, Korea*

#### ABSTRACT

**Objectives:** This study intends to evaluate the ecological risk of lead (Pb), arsenic (As), and their compounds according to the 2010 action plan on inventory and management for national priority chemicals and provide calculations of risks to the environment. By doing so, we aim to inform risk management measures for the target chemicals.

**Methods:** We conducted species sensitivity distribution (SSD) analysis using the collected ecotoxicity data and obtained predicted no effect concentrations (PNECs) for the in-water environment using a hazardous concentration of 5% (HC5) protective of most species (95%) in the environment. Based on the calculated PNECs for aquatic organisms, PNEC values for soil and sediment were calculated using the partition coefficient. We also calculated predicted exposure concentration (PEC) from nation-wide environmental monitoring data and then the hazard quotient (HQ) was calculated using PNEC for environmental media.

**Results:** Ecological toxicity data was categorized into five groups and five species for Pb and four groups and four species for As. Based on the HC5 values from SSD analysis, the PNEC value for aquatic organisms was calculated as 0.40 µg/L for Pb and 0.13 µg/L for As. PNEC values for soil and sediment calculated using a partition coefficient were 77.36 and 350.50 mg/kg for Pb and 24.20 and 112.75 mg/kg for As. The analysis of national environmental monitoring data showed that PEC values in water were 0.284 µg/L for Pb and 0.024 µg/L for As, while those in soil and sediment were respectively 45.9 and 44 mg/kg for Pb, and 11.40 and 19.80 mg/kg for As.

**Conclusions:** HQs of Pb and As were 0.70 and 0.18 in water, while those in soil and sediment were 0.59 and 0.13 for Pb and 0.47 and 0.18 for As. With HQs <1 of lead and arsenic in the environment, their ecological risk levels are found to be low.

**Key words:** Lead, Arsenic, Ecological risk assessment, PNEC, PEC

## I. 서론

현대사회가 산업화 및 도시화됨에 따라 다양한 중금속들로 인한 인위적인 환경오염이 늘어나고 있

며, 일부 지역에서는 심각한 위험성 문제를 유발시키기도 한다. 중금속(As, Pb, Cd, Cu, Cr, Hg, Zn 등)은 물, 대기, 토양 등 다양한 이동 매체를 통해 생태계에 축적되거나 잠재적으로는 인간 및 환경 생

<sup>†</sup>**Corresponding author:** Risk Assessment Division, National Institute of Environmental Research, Hwanggyeongro 42, Incheon, 22689, Republic of Korea, Tel: +82-32-560-7179, E-mail: hyojay97@korea.kr  
Received: 17 November 2019, Revised: 11 December 2019, Accepted: 13 December 2019

태계에 치명적인 피해를 입힐 수도 있다.<sup>1)</sup> 이와 같은 이유로 중금속으로 인한 환경오염이 인체건강 및 생태계에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 관심이 높아짐에 따라, 환경오염으로 인해 발생하는 문제를 해결하고 이에 대한 관리방안을 마련하기 위해 국가적인 차원에서 여러 정책들이 시행되고 있다. 우선 환경보건 기반구축을 마련하고 신규 유해인자의 중장기 관리 방안을 마련하는 환경보건종합계획(2011-2020)과,<sup>2)</sup> 환경오염 등으로부터 국민의 건강과 생태계의 안전을 보호하기 위한 환경보건법(2009년부터 시행)<sup>3)</sup>이 있다. 그리고 환경부에서는 ‘환경유해인자의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침’을 마련하였다. 위해성평가는 발생원 중심의 환경오염 관리에서 수용체 중심의 환경오염 관리로의 개념적 전환이 이루어지는데 있어서 중요한 도구로 활용된다<sup>4)</sup>. 즉 인체와 생태계에 화학물질로 인한 결과를 예측하기 위해서는 관련노출 및 독성정보를 체계적으로 검토하고 평가하는 것이다. 대부분의 환경문제는 최종적으로 인체영향과 연결되기 때문에 과학적 기초 자료를 바탕으로 특정한 환경문제와 인체영향과의 상관관계를 합리적으로 규명하고, 그 결과를 토대로 위해관리방안이 마련되어야 한다.<sup>3)</sup>

본 연구에서 활용되어진 납과 비소는 중금속 물질로 미국 환경청(US EPA)의 IRIS (Integrated risk information system)나 세계보건기구(WHO, World health organization)의 IARC (International agency for research on cancer)에서는 인체 발암 가능성 물질로 분류하고 있다.<sup>5-7)</sup> 일반적으로 두 물질은 공기 흡입이나 먼지 등 다매체를 통해 피부 접촉, 식품 섭취 및 음용수 등 다양한 노출경로를 통해 인체에 축적되고, 많은 국가에서는 수질 및 토양에 대한 환경기준을 설정하여 관리하고 있다.<sup>8-9)</sup> 화학물질등록 평가법에 따라 납(CAS 7439-92-1)은 제한물질로 지정되어 있으며, 비소(CAS 7440-38-2)는 유독물질로 지정되어 있다. 또한 화학물질정보시스템의 유해화학물질 분류표시에 따라 수생생물에 매우 유독하고 (H400), 장기적 영향에 의한 수생생물에 매우 유독한 물질(H410)로 분류되어 있다.<sup>10)</sup>

따라서 본 연구는 2010년 국가우선관리대상 물질 목록 마련 및 관리방안 추진계획에 따라 선정된 화학물질의 납과 비소를 대상으로 수용체 중심의 생태위해성을 평가하고, 나아가 환경에 미치는 실질적인

위해도를 산출하기 위해 수행하였다. 즉 전국규모의 환경모니터링 자료를 활용한 납(Pb)과 비소(As)에 대해 환경 매체별로 생태계에 영향을 미치지 않을 농도인 예측무영향농도(PNEC, Predicted no effect concentration) 값을 산출하였다. 또한 실제 환경 중 존재하는 유해물질의 예측환경농도(PEC, Predicted exposure concentration) 값을 산출함으로써, 환경위해도를 도출하고 노출수준의 예측 및 평가를 통해 상세위해성평가를 위한 초기 위해성평가로서의 그 목적이 있다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 생태독성자료 수집<sup>3)</sup>

납과 비소에 대한 생태독성자료 수집은 국제적으로 인정되고 통용되는 생태독성 데이터베이스인 ECOTOXknowledgebase<sup>11)</sup>에 명령어를 각각 Lead (납)와 Arsenic (비소)로 하여 수집하였으며, 해당물질에 대한 자료는 다음과 같은 조건에 의해 분류하였다. 첫째 담수와 해수로 구분되어지는 매체는 담수에만 해당되는 자료만 수집하였으며, 둘째 급성과 만성으로 구분되는 독성에서는 만성 자료만 적용하였다. 셋째 독성영향은 Population (군집), Growth (성장), Physiology (생리), Reproduction (생식) 및 Survival (치사) 등 확실한 영향이 보이는 자료를 선택하였으며, 마지막으로 동일한 생물종 중에서 가장 민감한 값을 선택하였으며, 원문자료를 확인한 후, 독성값, 기간, 독성종말점, 독성영향 등 독성 시험관련 정보가 없는 자료 또는 불확실한 자료는 모두 제외하였다.

### 2. 환경매체별 예측무영향농도(PNEC) 산정 방법

#### 2.1. 수생태에 서식하는 시험생물종에 대한 PNEC

수집 분류된 생태독성자료는 ETX 2.0 program (RIVM)을 활용하여 종민감도분포(SSD, Species sensitivity distribution)를 분석하였으며, 생태계 내 95% 이상의 생물종을 보호할 수 있는 HC<sub>5</sub> (Hazardous concentration 5%)를 산출하였다. PNEC 값은 SSD 평가를 통해 산출한 HC<sub>5</sub> 값을 활용하여 도출하였으며, 평가결과의 정규성 확인 및 HC<sub>5</sub>의 불확실성을 보정하기 위해 평가계수(AF, Assessment factor)를 사용하였다. 국립환경과학원 ‘화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침(2017)’을 근거로 수집된 생태독

성자료 중 국내 서식종에 대한 독성자료와 국외 서식종에 대한 독성자료를 구분하여 PNEC 값을 도출하고 도출된 값의 민감도 차이를 확인한 후, 민감도 차이가 없을 경우 국내의 생태독성 자료를 활용한 SSD를 통해 PNEC 값을 도출하였다(식 (1)).

$$PNEC_{water} = \frac{\text{Lowest LC}_{50} \text{ or NOAEL}}{AF} \quad (1)$$

**2.2. 토양에 서식하는 시험생물종에 대한 PNEC**

ECOTOXknowledgebase에서 토양에 대한 생태독성 자료가 충분하지 않으므로 국립환경과학원 ‘화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침(2017)’을 근거로 수생생물에 대한 독성자료만 가용한 경우에 적용하는 평형분배방법을 통해 수생태 PNEC 값으로부터 토양의 PNEC 값을 도출하였다(식 (2)).

$$PNEC_{soil} = (0.1176 + 0.01764 \times Koc) \times PNEC_{water} \quad (2)$$

**2.3. 퇴적물에 서식하는 시험생물종에 대한 PNEC**

ECOTOXknowledgebase에서의 퇴적물에 대한 생태독성 자료가 충분하지 않으므로 국립환경과학원 ‘화학물질의 위해성에 관한 자료 작성지침(2017)’을 근거로 수생생물에 대한 독성자료만 가용한 경우에 적용하는 평형분배방법을 통해 수생태 PNEC 값으로부터 잠정적인 퇴적물 PNEC 값을 추정하였다(식 (3)).

$$PNEC_{sediment} = (0.783 + 0.0217 \times Koc) \times PNEC_{water} \quad (3)$$

**2.4. 이차독성(Secondary poisoning)의 PNEC**

오염물질이 축적된 먹이를 섭취함으로써 영양단계의 상위포식자들이 영향을 받을 개연성을 평가하기 위해서는 이차독성을 고려할 필요가 있다<sup>12)</sup>. 유해화학물질의 경우 주요 노출경로가 먹이를 통한 섭취이기 때문에 상위 포식자(조(鳥)류, 포유류)의 먹이 생물에 대한 PNEC<sub>oral</sub>, 즉 이차독성 PNEC 값을 설정할 필요가 있다<sup>13)</sup>.

TGD-Part II<sup>14)</sup>를 바탕으로 아래의 식을 사용하여 PNEC<sub>oral</sub>을 추정하였다(식 (4)).

$$PNEC_{oral} = TOX_{oral} / AF_{oral} \quad (4)$$

**3. 환경매체별 예측환경농도(PEC) 산정 방법**

환경매체별 PEC 값을 산출하기 위해서 수질은 국립환경과학원 물환경정보시스템의 수질측정망 결과(2016)<sup>15-18)</sup>를 활용하여 전국규모의 하천수, 호소수, 산단하천, 도시관류 등 총 1,000개 지점의 모니터링 측정값으로부터 PEC 값을 산출하였다. 지점별 환경 모니터링 측정값은 대부분 불검출로 확인되었으며, 보수적인 가정을 통한 최대노출수준에서의 평가를 위해 불검출 지점은 해당 자료의 검출한계(MDL) 값인 0.068 µg/L (Pb) 및 0.024 µg/L (As)로 적용하였다. 토양은 국립환경과학원 2015년 토양측정망 및 토양오염실태조사결과를 활용한 총 1000개 지점 그리고 퇴적물은 국립환경과학원 물환경정보시스템의 퇴적물측정망 결과(2015)<sup>19)</sup>를 활용한 총 258개 지점 등 각각 전국규모의 지점별 연평균 값을 계산한 후, 상위 90분위수를 사용하여 환경농도를 산출하였다. 그리고 이차독성의 PEC 값은 참고문헌을 활용한 BCF<sub>fish</sub> (Bioconcentration factor) 또는 BMF (Biomagnification factor) 값을 TGD-Part II<sup>14)</sup>에 제시되어 있는 아래의 식을 대입하여 추정하였다(식 (5)).

$$PEC_{oral,predator} = PEC_{water} \times BCF_{fish} \times BMF \quad (5)$$

**III. 결 과**

수집된 생태독성자료는 앞서 수집방법에 언급한 바와 같이 원문자료 확인 후 불확실성 자료를 제외한 결과, 납에서는 5개 분류군 5종, 비소에서는 4개 분류군 6종으로 정리되었다. ‘위해성평가의 대상물질 선정기준, 절차 및 방법 등에 관한 지침’에는 SSD 평가를 하기 위한 최소한의 요건은 생태독성 자료가 최소 4개 분류군 이상, 총 5종 이상의 자료가 충족되어야 한다고 제시되어 있다. 따라서 지침을 근거로 납과 비소의 분류군 및 종에 대해서 SSD 평가에 최소요건을 갖춘 것으로 판단하여 실행하였다(Table 1). 생물종에 대한 데이터가 선형식 적합분포선에 가까이 분포할 경우, 이는 정규성 가정에 만족한다는 것을 의미한다. 본 연구의 SSD 평가 결과 그래프(Fig. 1)를 살펴보면 생물종(Fig. 1A)과 히스토그램(Fig. 1B)이 적합분포선에 가까이 분포하고 있으며, 이는 생물종에 대한 데이터 분포가 적합하다

**Table 1.** Chronic toxicity data on aquatic ecology of Pb and As

Taxon	Species	Endpoint (Duration)	Toxicity Value ( $\mu\text{g/L}$ )	Effect	References
Algae	<i>Scenedesmus acutus</i> var. <i>acutus</i>	NOEC (4 d)	1,090	Pop	Butler. 2012 <sup>20)</sup>
Amphibians	<i>Rana catesbeiana</i>	NOEC (7 d)	776	Pop	Rice et al. 1999 <sup>21)</sup>
Pb Plant	<i>Eichhornia crassipes</i>	NOEC (42 d)	250	Gro	Kay et al., 1984 <sup>22)</sup>
Invertebrate	<i>Hyalella azteca</i>	NOEC (42 d)	6.3	Mor	Besser et al. 2005 <sup>23)</sup>
Fish	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	NOEC (30 d)	8	Gro	Erickson et al. 2010 <sup>24)</sup>
Algae	<i>Scenedes obliquus</i>	NOEC (5 d)	5	Pop	Chen et al. 1994 <sup>25)</sup>
Diatom	<i>Stichococcus bacillaris</i>	NOEC (4 d)	20,789	Pop	Pawlik et al. 2004 <sup>26)</sup>
As Invertebrate	<i>Unionidae</i>	NOEC (273 d)	1.7	Rep	Klusek et al. 1993 <sup>27)</sup>
	<i>Lemna minor</i>	NOEC (14 d)	540	Rep	Jenner and Janssen. 1993 <sup>28)</sup>
Fish	<i>Pimephales promelas</i>	NOEC (30 d)	530	Gro	De Foe. 1982 <sup>29)</sup>
	<i>Oncorhynchus mykiss</i>	NOEC (84 d)	329	Gro	Cockell et al. 1992 <sup>30)</sup>

Gro: Growth, Mor: Mortality, Pop: Population, Rep:Reproduction.

고 할 수 있다. 그리고 지침에는 SSD 평가에 사용되는 생태독성자료가 최소요건을 충족할 경우 불확실성 계수(AF)를 적용할 수 있으며, 만성독성 자료들로부터 SSD 평가를 활용할 경우 AF는 1에서 5까지 적용할 수 있다고 제시되어 있다. 즉 독성자료가 충분할 경우 AF=1, 대표성이 부족하거나 충실하지 않는 자료의 경우 AF=5, 일반적으로는 AF=3이 적용가능하다.<sup>13)</sup> 이에 납과 비소에 대해 독성자료에 대한 최소요건을 충족하였지만, 대표성을 가질만한 자료가 충분하지 않기 때문에 일반적으로 적용할 수 있는 AF=3을 적용하였다. 납과 비소의 수생태종에 대한 PNEC 값은 Table 2에 제시한 HC<sub>5</sub> 값으로부터 (Pb 1.21  $\mu\text{g/L}$ , As 0.38  $\mu\text{g/L}$ ) AF를 적용한 결과, 납은 0.40  $\mu\text{g/L}$ , 비소는 0.13  $\mu\text{g/L}$ 로 각각 산출되었다.

SSD 평가에 의해 산출된 HC<sub>5</sub> 값이 정규분포를 따르는 모집단에서 취해졌는지에 대해 Anderson-Darling test를 통해 정규성 검증을 실시하였으며, 그 결과 모든 유의수준에서 정규성 수용이라는 결과를 보였다

(Table 3).

생태자료가 부족한 납과 비소에 대한 토양 및 퇴적물은 앞서 산정 방법에 언급한 바와 같이 평행분배방법을 사용하여 PNEC 값을 도출하였다. 우선 EPI Suite™ V4.11 (US EPA)을 활용하여 각 물질에 대한 K<sub>oc</sub> (Pb 4.297, As 3.888) 값을 도출하였는데, 앞서 도출한 PNEC<sub>water</sub> 값과 K<sub>oc</sub> 값을 식 (2)와 식 (3)에 대입하여 토양 및 퇴적물의 PNEC 값을 산출하였다. 그 결과 납에서의 토양 PNEC<sub>soil</sub>은 77.36 mg/kg, 퇴적물 PNEC<sub>sediment</sub>는 350.5 mg/kg, 비소에서 토양 PNEC<sub>soil</sub>은 24.2 mg/kg, 퇴적물 PNEC<sub>sediment</sub>는 112.75 mg/kg으로 추정되었다. 또한 환경매체별 PEC 값을 산출하기 위해 환경측정망을 자료를 활용하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 납과 비소에 대한 각 매체별 PEC 값은 수질에서, 납의 경우 0.284  $\mu\text{g/L}$ , 비소의 경우 0.024  $\mu\text{g/L}$ 였다. 그리고 토양 및 퇴적물에서 납의 경우 45.9 및 44.0 mg/kg, 비소의 경우 11.40 및 19.80 mg/kg인 것으로 추정된다.

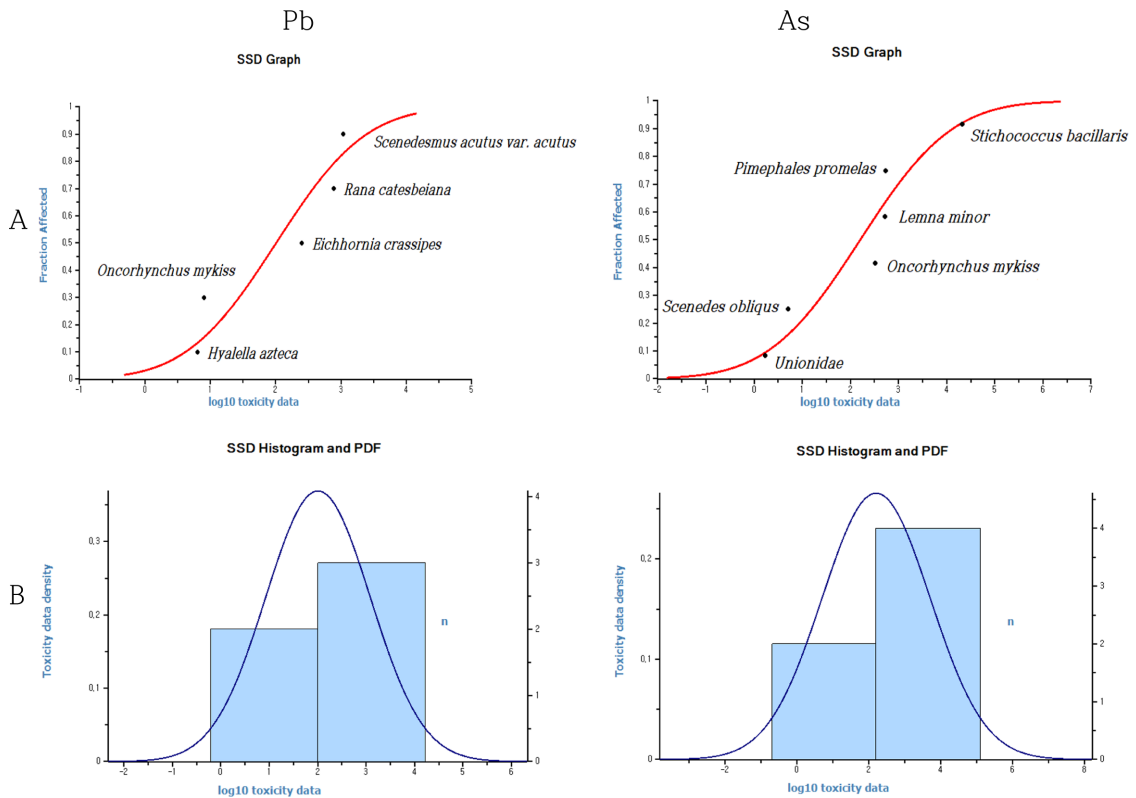


Fig. 1. Species sensitivity distribution for Pb and As.

Table 2. Result of HC<sub>5</sub> on chronic toxicity of Pb and As

Description	Pb		As	
	Value	log <sub>10</sub> (value)	Value	log <sub>10</sub> (value)
Lower estimate of the HC <sub>5</sub>	0.003	-2.54	0.0004	-3.36
Median estimate of the HC <sub>5</sub>	1.21	0.08	0.38	-0.43
Upper estimate of the HC <sub>5</sub>	12.24	1.12	7.76	0.89
Spread of the HC <sub>5</sub> estimate	4548.32	3.69	17960.98	4.25

Table 3. Normality test for SSD based on chronic toxicity data

Anderson-Darling test for normality		
Sign. level	Critical	Normality
0.1	0.631	Accepted
0.05	0.752	Accepted
0.025	0.873	Accepted
0.01	1.035	Accepted

납과 비소에 대한 이차독성은 실측자료가 없기 때문에 문헌을 통해 살펴보았다. 납과 비소에 관한 문헌을 확인한 결과 납은 조(鳥)류 및 포유류에 이차독성을 가지며, 비소는 조류에 대한 이차독성을 가지는 것으로 나타났다. 우선 납에 대한 이차독성은 포유류의 경우 만성 NOEC<sub>oral</sub>은 64 mg/kg,<sup>31)</sup> 조(鳥)류의 경우 NOEC<sub>oral</sub>은 100 mg/kg인 것으로 확인되었다.<sup>32)</sup> 그리고 비소에 대한 이차독성은 조(鳥)류에

**Table 4.** PEC by Environment media of Pb and As

Media	Number of location	Geometric mean		Minimum value		Maximum value		PEC	
		Pb	As	Pb	As	Pb	As	Pb	As
Water ( $\mu\text{g/L}$ )	1,000	0.095	0.027	0.068	0.024	65.99	5.25	0.284	0.024
Soil (mg/kg)	1,000	18.4	5.33	0.2	1.06	489.4	64.82	45.9	11.40
Sediment (mg/kg)	258	30.6	9.33	10	2.95	131.3	99.30	44.0	19.80

**Table 5.** Default BMF values for organic substances<sup>13)</sup>

log Kow	BCF <sub>fish</sub>	BMF
<4.0	<2,000	1
4.0-5.0	2,000-5,000	2
5.0-8.0	>5,000	10
8.0-9.0	2,000-5,000	3
>9.0	<2,000	1

서 93 mg/kg NOEC<sub>oral</sub>인 것으로 확인되었다.<sup>33)</sup> TGD-Part II<sup>14)</sup>를 참고하여 노출기간이 만성일 경우 평균 계수 30을 적용할 수 있으므로 이를 식 (4)에 대입한 결과, 납의 포유류 PNEC<sub>oral</sub>은 2.1 mg/kg, 조(鳥)류의 PNEC<sub>oral</sub>은 3.3 mg/kg으로 산출되었으며, 비소의 조(鳥)류 PNEC<sub>oral</sub> 값은 3.1 mg/kg으로 산출되었다.

이차독성의 PEC 값은 실측자료가 없기 때문에 문헌에서 발췌한 관련계수로부터 추정하여 산출하였다. 납의 BCF<sub>fish</sub> 값은 155<sup>34)</sup>이며, 납의 log(Kow) 값은 0.73이었다. 그리고 비소의 BCF<sub>fish</sub> 값은 4<sup>35)</sup>이며, 비소의 log(Kow) 값은 0.68이었다. 이를 바탕으로 Table 5를 참고하면 납과 비소의 생물확대계수(BMF) 값은 1이 된다. 따라서 식 (5)에 대입하면 납의 PEC<sub>oral</sub> 값은 44.02  $\mu\text{g/kg}$ , 비소의 PEC<sub>oral</sub> 값은 0.096  $\mu\text{g/kg}$ 인 것으로 산정되었다.

산출된 PNEC 값과 PEC 값을 비교하여 납과 비소에 대한 유해지수(HQ)를 도출하여 위해도를 산정하였다. 유해지수는 1을 기준으로  $\geq 1.0$ 인 경우 해당

물질에 대해 생태위해 가능성이 있다고 판정하며,  $\leq 1.0$  경우 위해가능성은 낮지만 생태위해도 관리가 필요하다고 판정할 수 있다. 따라서 유해지수 산정 결과, 납에 대한 수질의 유해지수는 0.70으로 위해가능성은 낮으나 주의할 필요성이 있으며, 토양 및 퇴적물의 유해지수는 각각 0.59 및 0.13으로 수질과 마찬가지로 생태위해도는 미미하나 주의할 필요성이 있는 것으로 평가되었다. 비소의 경우 수질의 유해지수는 0.18, 토양 및 퇴적물에서의 유해지수는 각각 0.47 및 0.18로 납과 비슷한 유해지수를 나타냈다. 마지막으로 납과 비소의 이차독성에 대한 유해지수는 조(鳥)류의 경우 0.013 및 3.1E-05이며, 포유류의 경우 납에서 0.021로 역시 마찬가지로 미미한 수준의 생태위해도를 보였다(Table 6).

#### IV. 고 찰

환경유해인자 및 환경성질환 발생에 대한 지속적인 증가로 인해 국민적 우려가 높아지고 있으며, 국가 차원에서 보다 체계적인 화학물질 관리를 위해 하는 위해성평가에 기반한 환경정책수립이 필요하다. 최근 화학물질과 관련한 환경정책은 사후관리 중심적인 관점이 아닌 사전예방을 중심으로 하는 방향으로 선회하였으며, 또한 화학물질 관리에 있어서 국민건강 보호와 생태계 보전이라는 가치에 중심에 두고 있다.<sup>36)</sup> 캐나다, 네덜란드 등 선진외국에서 생태

**Table 6.** Hazard Quotient Results by environmental media of Pb and As

Environmental media	PEC		PNEC		HQ	
	Pb	As	Pb	As	Pb	As
Water ( $\mu\text{g/L}$ )	0.28	0.024	0.40	0.13	0.70	0.18
Soil (mg/kg)	45.9	11.40	77.36	24.20	0.59	0.47
Sediment (mg/kg)	44	19.80	350.50	112.75	0.13	0.18
Secondary toxicity ( $\mu\text{g/kg}$ )	Bird		3300	3100	0.013	3.1E-05
	Mammalia	44.02	0.096	2100	-	0.021

위해도와 위해성평가를 환경기준설정에 활용하고 관리하고 있는 사례를 살펴보았다. 캐나다의 환경 관리 기준(EQG, Environmental quality guidelines)은 대기, 수계, 토양 생태계의 질을 관리하기 위하여 과학적 기준을 바탕으로 전국적으로 적용되고 있다. EQG는 과학적으로 평가된 위해도에 근거한 값이며, 수계 및 토양 내 우선관리물질에 대한 위해도, 환경 관리 기준의 척도 등이 포함되어 있다. 네덜란드의 생태독성학적 위해기준(ERL, Ecotoxicological risk limit)은 과학적 위해성평가 절차에 의해 산출된 값으로, 설정된 기준 이상으로 노출되었을 경우 생태계의 영향이 예측되어지는 값이다. ERL은 생태위해 수준과 인체위해수준, 최대허용농도, 무영향농도 등 다양한 수준에서 설정되어 있다.<sup>37)</sup>

본 연구에 활용되어진 납과 비소는 국가우선관리 대상 물질목록 마련 및 관리방안 추진계획에 따라 수용체 중심의 생태위해성평가를 실시하였으며, 그에 따른 환경위해도를 도출하고 노출수준의 예측 및 평가를 통해 상세위해성평가를 위한 초기 위해성평가로서의 그 목적이 있다.

본 연구는 사람의 건강이나 생태계에 영향을 주는 유해인자에 대해 위해성평가를 실시하도록 하는 ‘환경유해인자의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침’의 절차와 규정에 따라 수행하였다. 생태위해성평가는 수용체가 다양한 유해인자에 노출되었을 경우 발생가능한 생태학적 영향의 개연성을 평가하는 과정으로,<sup>38)</sup> 문제인식을 통해 노출평가 및 독성평가 수행 후, 위해성을 결정하는 단계로 이루어진다.<sup>12)</sup> 우선 생태위해성평가는 대표 생물종 한 종의 독성값에 평가계수를 적용하여 PNEC을 산출하는 보수적인 평가방법과 생물종의 다양한 민감도를 확률적인 분포로 나타내는 중민감도분포(SSD)를 이용하는 평가방법이 있다. 다양한 생물종을 고려하여 평가하는 SSD 평가가 제한된 자료로 인해 불확실성이 높은 평가계수 방법에 비해 신뢰도가 높다.<sup>39)</sup> 하지만 SSD 평가는 수집되는 생태독성자료가 양적·질적으로 풍부해야 신뢰성 있는 평가가 이루어진다. 따라서 항목별 위해성평가에 필요한 신뢰성 있는 자료를 확보하는 것이 우선이며, 다음으로 자료를 검토하여 적용 가능한 독성값 또는 평가계수를 선정하며, 최종적으로 독성값과 평가계수를 이용해 예측무영향농도(PNEC)를 도출하여야 한다. SSD 평가는 생물

군집 안에서 화학물질에 대한 다양한 범위의 민감도들을 포괄할 수 있으며, 서로 다른 분류군을 대표할 수 있는 선택된 종을 이용하여 수행할 수 있는 생태독성영향의 평가자료 집합이다. SSD평가를 위한 최소자료 요건은 US EPA의 경우 6개 분류군에서 8종 이상, OECD는 8종 이상, EU TGD는 8개 분류군 10종 이상 등<sup>13)</sup> 국가, 기관별로 제시하고 있는 최소자료 요건이 다르며, 수집되는 정보의 양과 질에 따라 HC<sub>5</sub> 도출에 유의한 영향을 준다. 예를 들면 국내 기존 연구에서는 납과 비소는 4개 분류군 28종에서 3.8, 8.4이었으며,<sup>40,41)</sup> 국외 연구에서는 납의 경우 31종에서 10.5, 비소는 14종 23.3이었다.<sup>42)</sup> 본 연구에서는 국제적으로 통용되고 있는 생태독성 데이터베이스를 통해 관련 자료를 수집 정리하였으며, 최소자료 요건에 관해 국내 관련지침에 구체적인 적용안이 있으므로 이를 적용하여 수행한 결과, 납의 HC<sub>5</sub> 값은 5개 분류군 5종에서 1.21, 비소의 HC<sub>5</sub> 값은 4개 분류군 6종에서 0.38이 도출되었다. 이 결과로부터 SSD 평가를 실시하고 이를 통해 확보된 값을 활용하여 수 생태종의 PNEC 값을 산출하였다. 한편 토양 및 퇴적물은 독성데이터가 충분하지 않기 때문에, 수생생물에 대한 독성자료만 확보된 경우 적용할 수 있는 평형분배방법을 이용하여 도출하였다. 평형분배방법에는 유기탄소분배계수(Koc) 값이 필요하지만, 화학물질의 납과 비소는 중금속 물질로서 Koc 값이 존재하지 않는다. 이에 EPI Suite™ V4.11 (US EPA)에 각 물질에 대한 정보를 입력한 후, 옥탄올-물분배계수(Kow)로 산출되어진 값이 변환된 Koc 값을 적용하여 PNEC 값을 도출하였다. 생태위해성평가의 위해도를 결정하기 위해서는 PNEC 값과 실제 환경 중에 존재하는 유해물질의 예측환경농도(PEC) 값이 필요하다. 이에 전국규모의 환경모니터링 자료로 이용하여, 환경매체별 PEC 값을 산출하였다. 수질은 물환경정보시스템의 수질측정망, 토양은 토양측정망 및 토양오염실태조사결과 그리고 퇴적물은 물환경정보시스템의 퇴적물측정망 결과를 활용하였다. 이는 ‘환경유해인자의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침’을 근거로 수행한 것이다. 지침에는 모니터링 결과의 대표값을 산정하기 위해서는 시공간적 변이를 고려해야 되며, 조사 지역 내 환경노출농도는 동일지점 내 상위 90분위수 간의 지역 평균값 또는 동일지점 내 연평균 값

의 조사지역 내 90분위수로 사용하거나 추정이 어려운 경우 활용가능한 자료 중 최대값을 이용할 수 있다고 제시되어 있다.

환경매체별 산출된 PNEC 값과 PEC 값을 비교하여 납과 비소가 생태계 환경에 어느 정도의 유해지수를 가지는지에 대해 살펴보았다. ‘화학물질 배출량 정보를 이용한 초기 위해성평가 해설서’에 따르면 환경위해도는 용량-반응 평가의 결과 값과 노출 평가에서 추정된 노출량(농도)을 비교 평가하여, 추정된 노출량(농도)이 용량-반응 평가 기준치보다 높은지 낮은지를 도출한 후, 이를 통해 인체건강과 환경에서의 위해성이 우려되는지를 결정한다.<sup>3)</sup> 생태위해성평가의 유해지수는 1을 기준으로, 1을 초과하는 경우 해당매체의 PEC 수준에서 위해성이 있음을 경고하게 되며, 그에 따라 전국규모 또는 위해우려지역에 대한 상세한 생태위해성평가를 실시할 필요성이 있다. 한편 전국 규모의 유해지수가 1을 초과하지 않을 뿐만 아니라 동시에 위해가 우려되는 지역 내의 유해지수가 1을 초과하지 않는 경우에 한해서 위해가능성이 없는 것으로 판단한다.

## V. 결 론

본 연구는 화합물질의 납과 비소에 대해 환경 매체별 안전수준을 규명하고, 합리적인 위해관리방안 마련을 위해 수 생태종의 만성독성 자료를 수집 분류한 후 SSD 평가를 실시하였으며, 이 값을 바탕으로 매체별 PNEC 값을 산출하였다. 또한 전국규모의 환경 모니터링 자료를 분석하여 PEC 값을 산출하였다. 납과 비소에 대한 위해도결정은 환경모니터링 자료로부터 산출된 PEC 값에 환경매체별로 산출된 PNEC 값을 나누어 유해지수를 산정함으로써 추정하였다. 위해도결정 판정방법은 유해지수 값이 1 이상일 경우 위해우려가 높으며, 1 미만일 경우 위해우려가 낮다고 판정한다. 따라서 전국규모의 환경모니터링 자료를 통해 납과 비소에 대한 유해지수를 산정하였으며, 수질, 토양, 퇴적물 및 이차독성 모두 1 미만으로 생태위해가능성은 낮지만 주의할 필요성이 있는 것으로 판단된다. 이처럼 전국규모에서는 위해우려가 없었지만, 국지적인 위해우려지역에서 위해우려가 높은 경우 보다 상세한 위해성평가를 수행할 필요성이 있으므로 차후 위해우려지역에

대해 상세위해성평가를 실시하여 정량적 생태위해도를 산정해 볼 필요가 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 『생활공감 유해물질의 매체통합 위해성평가』 연구사업의 지원(NIER-SP-2014-223)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Kong IC, Kwon HY, Ko KS. Bioassessment and Comparison of Toxicity of Arsenics based on the Results of Various Bioassays. *J Korean Soc Environ Eng.* 2010; 32(8): 791-805.
2. Park JG. Environment and Health: An Overview of Current Trends at WHO and OECD. *J Environ Health Sci.* 2013; 39(4): 299-311.
3. Lee BW, Lee BC, Yoon HJ, Park KW, Kim PJ. Ecological Risk Assessment for Cadmium in Environmental Media. *J Environ Health Sci.* 2018; 44(6): 548-555.
4. Shon JG, Lee CM. The Risk Assessment of Hazard Chemicals in Environment. *J Korean Soc Environ Eng.* 2007; 29(5): 477-488.
5. United States Environmental Protection Agency (US EPA). Lead and Compounds (Inorganic) (CAS-RN7439-92-1). IRIS. 2015. Available: <http://www.epa.gov/iris/subst/0277.htm>.
6. International Agency for Research on Cancer (IARC). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Inorganic and Organic Lead Compounds. 2006; 87.
7. United States Environmental Protection Agency (US EPA). Risk assessment guidance for superfund volume: Human health evaluation manual (Part A). 2004.
8. Jung JW, Nam KP. Analysis on the Risk-Based Screening Levels Determined by Various Risk Assessment Tools (III): Proposed Methodology for Lead Risk Assessment in Korea. *J Soil Groundw Environ.* 2015; 20(6): 1-7.
9. Sim KT, Kim DH, Lee JW, Lee CH, Park SY, Seok KS et al. Exposure and Risk Assessments of Multimedia of Arsenic in the Environment. *J Environ Impact Assess.* 2019; 28(2): 152-168.
10. National Chemical Information System (NCIS). Available: <http://www.ncis.go.kr/main.do>. CAS 7440-



- 43-9 [accessed 2 October 2019].
11. ECOTOXknowledgebase. Available: [http://archive.epa.gov/med/med\\_archive\\_03/web/html/ecotox.html](http://archive.epa.gov/med/med_archive_03/web/html/ecotox.html) [accessed 14 September 2018].
  12. Lee WM, Kim SW, Jeong SW, An YJ. Comparative study of Ecological Risk Assessment: Deriving Soil Ecological Criteria. *J Soil Groundw Environ*. 2012; 17(5): 1-9.
  13. National Institute of Environmental Research. Risk Assessment Guidebook. 2011: 1-387.
  14. European Commission. Technical Guidance Document on Risk Assessment. Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substance. Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk Assessment for existing substance. Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. Part II. 2003: 1-328.
  15. Water Environment Information System. Available: [http://www.water.nier.go.kr/waterData/general-Search.do?menuIdx=3\\_2\\_1&siteTypeCd=A](http://www.water.nier.go.kr/waterData/general-Search.do?menuIdx=3_2_1&siteTypeCd=A) [accessed 10 September 2018].
  16. Water Environment Information System. Available: [http://www.water.nier.go.kr/waterData/general-Search.do?menuIdx=3\\_2\\_1&siteTypeCd=B](http://www.water.nier.go.kr/waterData/general-Search.do?menuIdx=3_2_1&siteTypeCd=B) [accessed 10 September 2018].
  17. Water Environment Information System. Available: [http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3\\_2\\_1&siteTypeCd=E](http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3_2_1&siteTypeCd=E) [accessed 10 September 2018].
  18. Water Environment Information System. Available: [http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3\\_2\\_1&siteTypeCd=F](http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3_2_1&siteTypeCd=F) [accessed 10 September 2018].
  19. Water Environment Information System. Available: [http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3\\_2\\_1&siteTypeCd=R](http://www.water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do?menuIdx=3_2_1&siteTypeCd=R) [accessed 10 September 2018].
  20. Butler R, Effect of Heavy Metals Found in Flue Gas on Growth and Lipid Accumulation for Green Algae *Scenedesmus obliquus*. Master of science. Thesis. Utah State University. Logan. 2011: 1-83.
  21. Rice TM, Blackstone BJ, Nixdorf WL, Taylor DH. Exposure to lead induced to hypoxia-like responses in bullfrog larvae (*Rana catesbeiana*). *Environ Toxicol Chem*. 1999; 18: 2283-2288.
  22. Kay SH, Haller WT, Ganard LA. Effects of heavy metals on water hyacinth *Eichhornia crassipes*. *Aquat Toxicol*. 1984; 5: 117-128.
  23. Besser JM, Brumbaugh WG, Brunson EL, Ingersoll CG. Acute and Chronic Toxicity of Lead in Water and Diet to the Amphipod *Hyaella azteca*. *Environ Toxicol Chem*. 2005; 24(7): 1807-1815.
  24. Erickson RJ, Mount DR, Highland TL, Hockett JR, Leonard EN, Mattson VR, Dawson TD, Lott KG. Effects of Copper, Cadmium, Lead, and Arsenic in a Live Diet on Juvenile Fish Growth. *Can J Fish Aquat Sci*. 2010; 67: 1816-1826.
  25. Chen F, Chen W, Dai S, Toxicities of four arsenic species to *Scenedesmus obliquus* and influence of phosphate on inorganic arsenic toxicities. *J Toxicol Environ Chem*. 1994; 41: 1-7.
  26. Pawlik-Skowronska B, Pirszel J, Kalinowska R, Skowronski T. Arsenic Availability, Toxicity and Direct Role of GSH and Phytochelatin in As Detoxification in the Green Alga *Stichococcus bacillaris*. *Aquat Toxicol*. 2004; 70(3): 201-212.
  27. Klusek CS, Heit M, Hodgkiss S. Trace Element Concentrations in the Soft Tissue of Transplanted Freshwater Mussels Near a Coal-Fired Power Plant. In: R.F. Keefer and K.S. Sajwan (Eds.), Trace Elements in Coal and Coal Combustion Residues, Boca Raton. 1993: 59-95.
  28. Jenner HA, Janssen-Mommen JPM. Duckweed *Lemna minor* as a tool for testing toxicity of coal residues and polluted sediments. *Arch Environ Contam Toxicol*. 1993; 25(1): 3-11.
  29. DeFoe DL. Arsenic (V) Test Results Memorandum ORL Spehar. US Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory Duluth, MN, USA, dated July 9, 1982.
  30. Cockell, KA, Hilton JW, Bettger WJ. Hepatobiliary and Hematological Effects of Dietary Disodium Arsenate Heptahydrate in Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comp Biochem Physiol, Part C*. 1992; 103(3): 453-458.
  31. Morris HP, Laug EP, Morris HJ, Grant RL. The growth and reproduction of rats fed diets containing lead acetate and arsenic trioxide and the lead and arsenic content of newborn and suckling rats. *J Pharmacol Exp Ther*. 1938; 64(4): 420-445.
  32. European Commission CIRCABC. Lead Environmental Quality Standards dossier. 2011: 1-66.
  33. Stanley T, Spann J, Smith G and Roscoe R. Main and interactive effects of arsenic and selenium on mallard reproduction and duckling growth and survival. *Arch Environ Contam Toxicol*. 1994; 26(4): 444-451.
  34. California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). Technical support Document for Exposure Assessment and Stochastic Analysis September 2000. Appendix H Fish Biocon-

- centration Factors. Available: <http://oehha.ca.gov/media/downloads/cmrn/apenh.pdf> [accessed 30 September 2019].
35. World Health Organization (WHO). Environmental health criteria224. Arsenic and Arsenic compounds. Second edition. 2001: 1-114.
36. National Institute of Environmental Research (NIER). Risk Assessment of Chemical on the National Priority List. 2013: 1-80.
37. Ministry of Environment. [http://webbook.me.go.kr/DLi\\_File/091/018/006/5557572.pdf](http://webbook.me.go.kr/DLi_File/091/018/006/5557572.pdf) [accessed 20 October 2019].
38. Kim SW, Kwak JI, Yoon JY, Jeong SW, AN YJ. Selection of Domestic Test Species Suitable for Korean Soil Ecological Risk Assessment. *J Korean Soc Environ Eng.* 2014; 36(5): 359-366.
39. An YJ, Lee WM, Nam SH, Jeong SW. Proposed Approach of Korean Ecological Risk Assessment for the Derivation of Soil Quality Criteria. *J Soil Groundw Environ.* 2010; 15(3): 7-14.
40. National Institute of Environmental Research. Multi-media and multi-pathway aggregate risk assessment (IV)-Lead (Pb)-. 2014: 1-183.
41. National Institute of Environmental Research. Multi-media and multi-pathway aggregate risk assessment (IV)-Arsenic (As)-. 2014: 1-177.
42. Philippe C, Merin K, Alberto P. Estimating Hazardous concentrations by an informative bayesian approach. *Environ Toxicol Chem.* 2013; 32(3): 602-611.

<저자정보>

이병우(전문위원), 이병천(환경연구사),  
김필제(과장), 윤효정(환경연구사)