

# 글로벌 탄소중립 혁신과 연대를 위한 협력 포럼

International Innovation Forum on Solidarity and Cooperation for Carbon Neutrality

## Session 2

### 지속가능한 제주: 환경발자국 평가와 시사점

**김준범 Junbeum Kim**

프랑스 UTT 교수

Université de Technologie de Troyes





# 지속가능한 그린제주; 환경발자국 평가를 통한 접근 및 시사점

Junbeum KIM, Ph.D., Associate Professor  
 CREIDD Research Centre on Environmental Studies & Sustainability,  
 University of Technology of Troyes, France



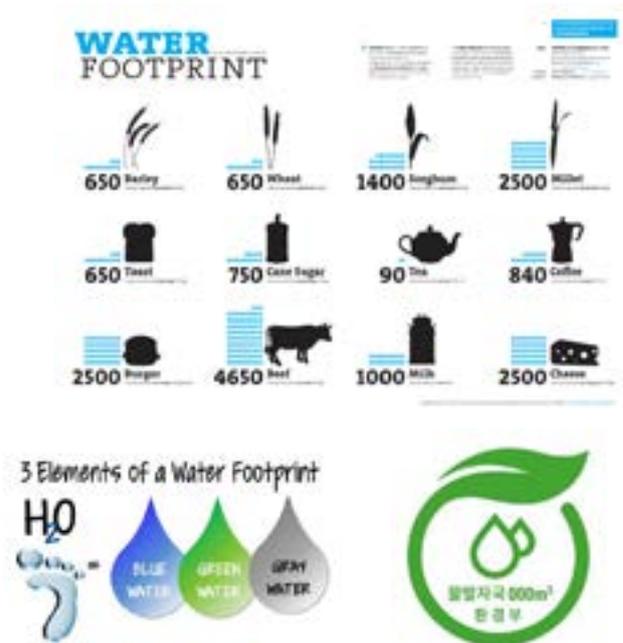
## 환경발자국 <sup>2</sup>

### □ 탄소발자국



제품, 서비스 및 시스템  
 등에 대한 평가

### □ 물발자국



□ 미세먼지발자국

2022년 10월 27일자 **환경경제**



**'미세먼지발자국 인증제' 도입 필요하다**

**기고**  
**공헌형**  
 박승호 (주요연구원)

배터리산업은 전 세계적으로 가장 높은 성장세를 보이고 있다. 그러나 환경적 부담이 크고, 특히 미세먼지 발생이 우려된다. 이에 따라, 배터리의 친환경성을 평가하고 인증하는 제도가 필요하다. 이를 위해서는, 배터리 제조업체가 환경적 영향을 줄이기 위해 노력하는 것을 인정하고 인증하는 제도가 필요하다. 이를 위해서는, 배터리 제조업체가 환경적 영향을 줄이기 위해 노력하는 것을 인정하고 인증하는 제도가 필요하다.

□ A Proposal of PMF Certification mark



□ 중금속 인체/생태 독성발자국

**Urban toxicity footprint (Air Emission)**

Bar charts showing heavy metal emissions and toxicity footprint for various countries. A table below compares local and global toxicity footprint values.

지역별 독성발자국	글로벌 독성발자국	비율 %
중국	124,028	18.0%
미국	335,301	48.0%
일본	67,406	9.6%
한국	74,609	10.6%
영국	65,009	9.2%
독일	62,731	8.9%
프랑스	59,300	8.4%
이탈리아	325,000	46.1%
일본	10,137	1.4%
한국	78,119	11.0%
중국	18,119	2.6%
미국	31,770	4.5%
영국	23,000	3.2%
독일	247,000	35.1%
프랑스	61,600	8.7%

AS, CD, NI만 고려한 점수 →

□ 중금속 인체/생태 독성발자국

**경향신문**

**경북, '대기 중 중금속 독성' 독일의 12배...서울-부산-경기는 5배**

경북, '대기 중 중금속 독성' 독일의 12배...서울-부산-경기는 5배

경북, '대기 중 중금속 독성' 독일의 12배...서울-부산-경기는 5배

경북, '대기 중 중금속 독성' 독일의 12배...서울-부산-경기는 5배



**경향신문 ('21.10.27)**

- 경북, '대기 중 중금속 독성' 독일의 12배... 서울-부산-경기는 5배, 전국 대부분 심각
- 양언은 산업활동, 항해발전소... 특히, 모항철강산업(대지) 주변 티저연속도 높음
- '대기 중 중금속' 농도 계속 낮아지는 추세...나, 중금속 줄이기 위한 정책 필요

- **강박**
  - 중금속중량당은 인구50만 이상 도시지역, 산업단지 등에 우선 설치
  - 고농도 예상지역에 설치되므로 경북을 대표한다고 보기 어려움
  - 도내 전 시군에 설치된 도시대기중금속 측정결과를 경북을 대표하는 대기질 농도임
- 기사에서 언급한 독성발자국은 학문적 개념, 법적 환경기준 아님
  - 국제 환경기준이 있는 1999년 연간 평균치인 0.5ug/m³을 안축함
  - 그 외 항목은 국내 환경기준이 아직 마련되지 있지 활용(10 권)기준은 바람
- 또한, 기사의 분석값은 과거(1991~2019) 측정결과를 활용한 것으로 **대기개선을 위한 각종 정책\*이 본격적으로 추진되기 이전일**
  - 미세먼지 특별법 제정(19, 대기관리공약법 제정(20), 그린뉴딜과 탄소중립 등
- **강박**
  - 대기 중 중금속의 종합적인 측정이 가능하도록 측정망 선급 설치 확대
  - 중금속 배출업소 저농도정기 강화 및 시설 개선 지원



※표 1-1과 함께 도시별 대기환경정보를 보려면 '2022' 섹션을 클릭

구분	구명	종류	PM10		PM2.5		O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	중금속	기타
			연평균	연최대	연평균	연최대								
제주	이도동	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	연동	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	조천읍	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	한림읍	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	노형로	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	서귀포	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	성산읍	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	대정읍	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	남원읍	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10
	서귀포	도시	10.5	100	3.5	15	100	10	10	10	10	10	10	10

표. 제주특별자치도 기후대기환경 현황

1. 대기오염측정망 운영현황 : 측정소 운영 위치



표 1. 제주도 내 대기오염측정소 현황

구분	측정소	위 치	설치일자	비고
제주	이도동	제주시청	1994. 12.	2017.09. : 노후장비교체
	연 동	도청2청사	2006. 12.	2017.08. : 노후장비교체
	조천읍	조천읍 운동장	2021.01.	2021.01. : 신설
	한림읍	한림읍 운동장	2021.01.	2021.01. : 신설
	노형로	노형오거리	2019. 11.	2019.11. : 신설
서귀포	동홍동	서귀포 기상대	2002. 03.	2018.11. : 이전
	성산읍	동부소방서	2017. 10.	2017.10. : 신설
	대정읍	대정읍 청소년수련관	2018. 11.	2018.11. : 신설
	남원읍	동부노인복지회관	2019. 12.	2019.12. : 신설

그림 1. 제주특별자치도 대기오염측정망 현황

● 대기오염경보제 운영, 대기오염실태 파악 및 대기질 개선대책 수립

- 2021년 현재 도시대기 측정소 8개소 및 도로변 대기측정소 1개소 운영
- SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM-10, PM-2.5 중 6개 항목을 상시 자동측정하여 에어코리아 및 제주특별자치도 실시간 대기질 정보 플랫폼을 통해 도민들에게 실시간으로 정보 제공

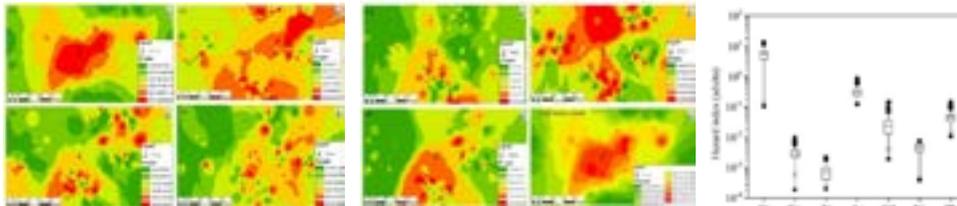
출처: 탄소중립시대 기후대기환경 연구 현황과 지자체간 공동 연구 방향 검토 세미나집, 2022

□ Urban system and toxicity footprint

1) Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City, O. Morton-Bermea et al., Journal of Geochemical Exploration, Volume 101, Issue 3, June 2009, Pages 218-224  
Average heavy metal concentration (mg/kg) in urban soils from different cities in the world.

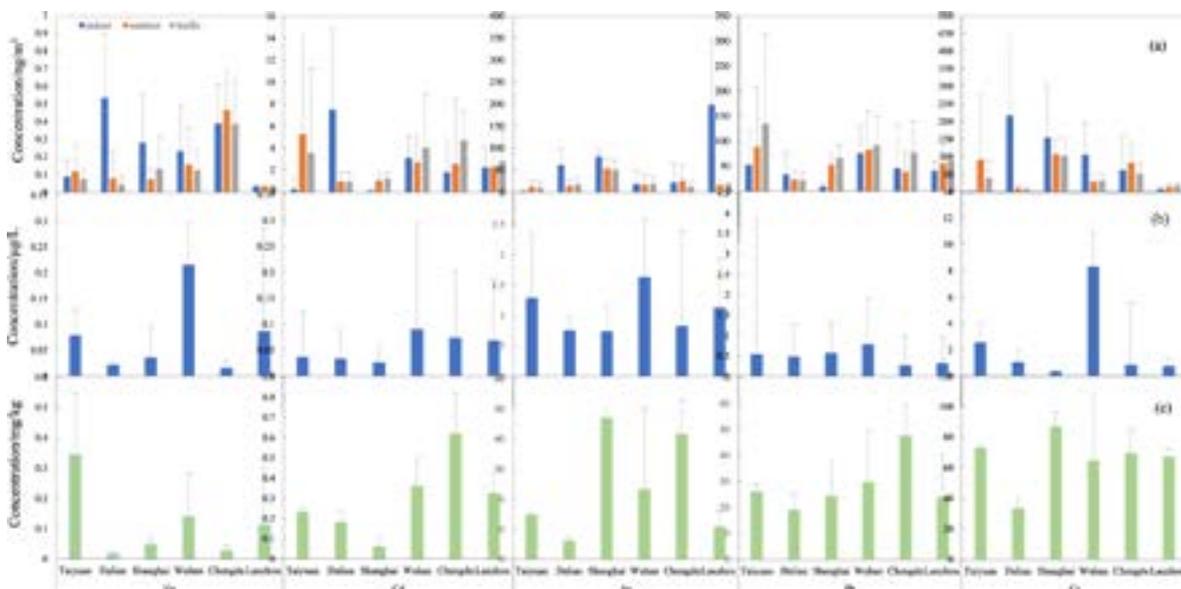
Element	Mexico (this work)	Bangkok	Hamburg	Madrid	Oslo	Palermo	Central London	Hong Kong
Cr	117	26.4	95.4	74.7		34		
Cu	100.8	41.7	146.6	71.7	123	63	73	24.8
Ni	39.8	24.8	62.5	14.1	41	17.8		
Pb	140.5	47.8	168	161	180	202	294	93.4
Zn	306.7	118	516	210	412	138	183	93.9

2) Assessment of heavy metal pollution and human health risks in urban soils around an electronics manufacturing facility, Wei Wu et al., Science of The Total Environment, Volume 630, 15 July 2018, 53-61

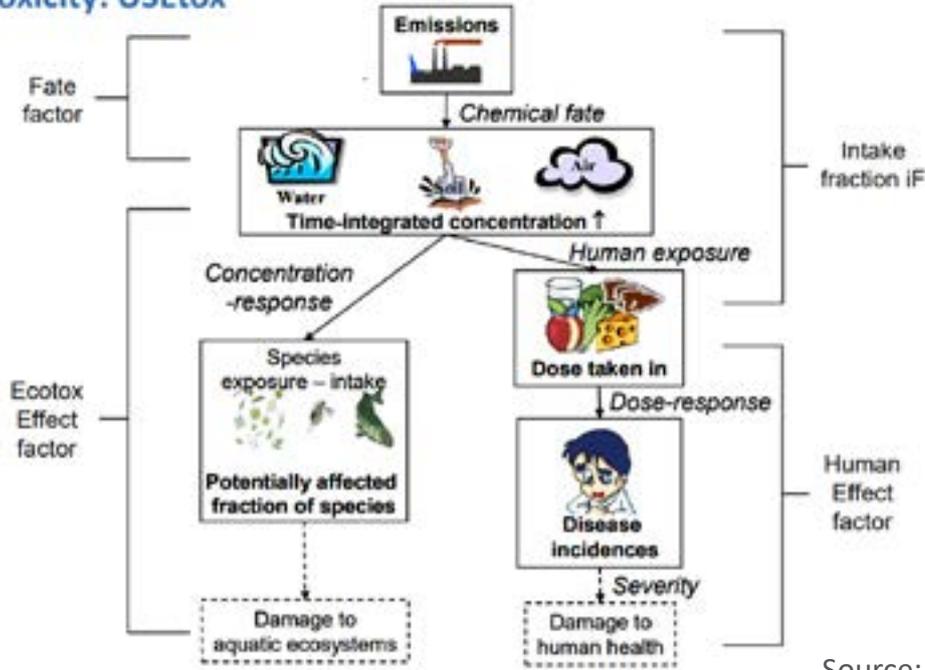


□ Urban system and toxicity footprint

3) Assessment of residents' total environmental exposure to heavy metals in China Scientific Reports volume 9, 16386 (2019)  
The concentration of Hg, Cd, As, Pb, and Cr in the (a) air, (b) water, and (c) soil in the different areas tested.



Toxicity: USEtox



Source: Ralph Rosenbaum

Urban system and toxicity footprint

Classification and Characterization in Life Cycle Assessment

Substance	Amount (kg)	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)	ODP (kg CFC-11 eq/kg)	POCP (kg ethylene eq/kg)	AP (kg SO <sub>2</sub> eq/kg)
CO <sub>2</sub>	20	1			
Methane	2	25		0.006	
CFC-11	0.005	4000	1		
NO <sub>2</sub>	2			0.028	0.70
SO <sub>2</sub>	1				1.00

**Indicator Result**

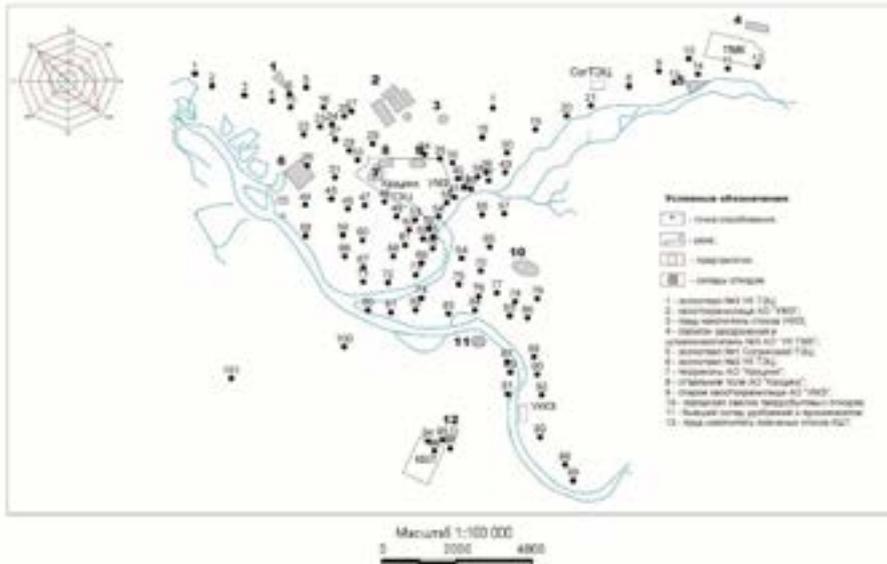
20x1 = 20 kg CO<sub>2</sub>eq  
 2x25 = 42 kg CO<sub>2</sub>eq  
 0.005x4000 = 20 kg CO<sub>2</sub>eq  
 (20 + 42 + 20) kg CO<sub>2</sub>eq = 82 kg CO<sub>2</sub>eq

Name	freshwater ecotoxicity	human toxicity	terrestrial ecotoxicity	Unit
Antimony	2.13	35,234.00	6.72	kg 1,4-DCB-Eq
Arsenic	1.74	649,510.00	5.78	kg 1,4-DCB-Eq
Barium	0.40	53,378.00	0.98	kg 1,4-DCB-Eq
Chromium	0.12	0.22	4.66	kg 1,4-DCB-Eq
Silver	50.54	57,119.00	2,179.00	kg 1,4-DCB-Eq
Zinc	0.62	2,814.30	20.76	kg 1,4-DCB-Eq

• ReCiPe method, Characterization factors for Ecotoxicity and Human toxicity (kg 14-DCB eq.)  
 : 6 elements are in the list

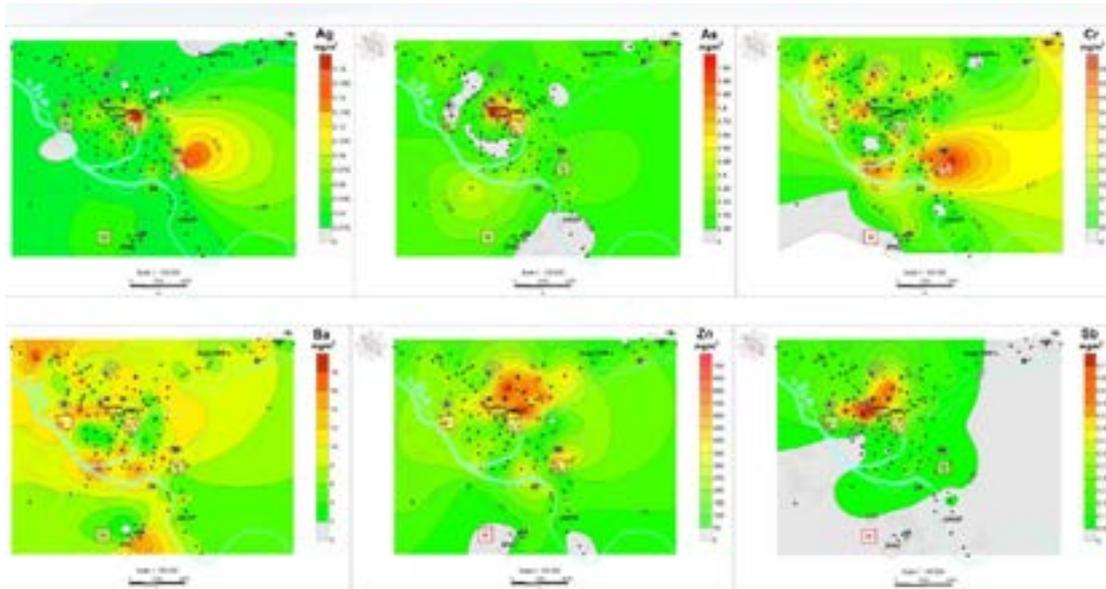
□ Urban system and toxicity footprint

- ✓ Soil and tree leaves (bio-indicators) sampling and analysis
- ✓ Emission mapping



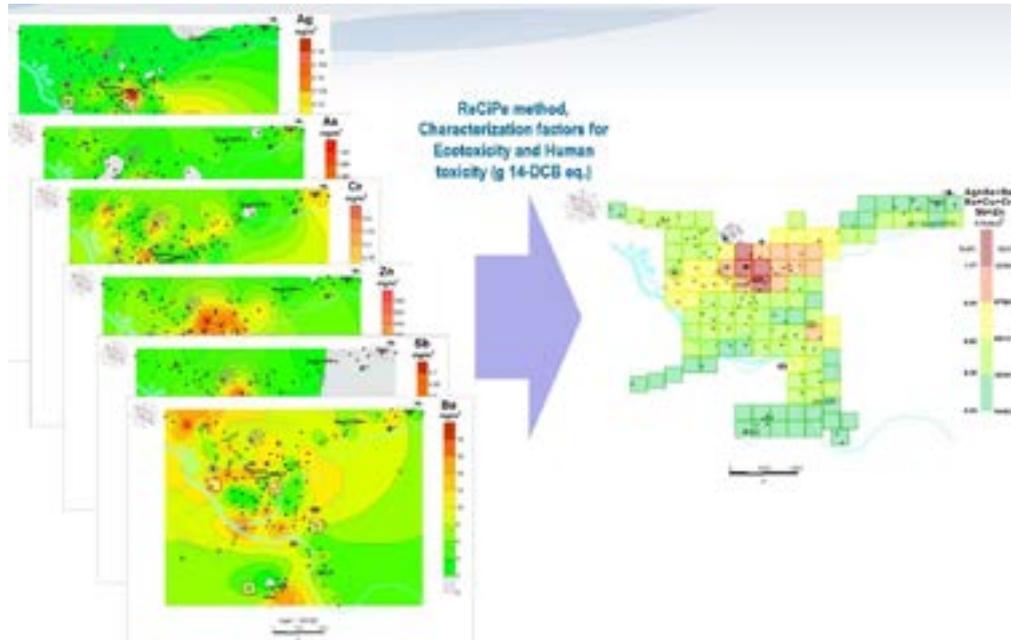
□ Urban system and toxicity footprint

- ✓ Soil and tree leaves (bio-indicators) sampling and analysis
- ✓ Emission mapping



□ Urban system and toxicity footprint

- ✓ Ecotoxicity and human toxicity impacts in urban area and system



□ Case of city of PARIS

- Moss sampling and chemical elements analysis: Trace metals data



Montparnasse Cemetery  
in Paris urban area  
(21 cemeteries in Paris)



*Grimmia pulvinata*  
(very common species of cushion moss with a worldwide distribution; can often be found on walls and concrete surfaces, 10-15 years life time)

Case of city of PARIS

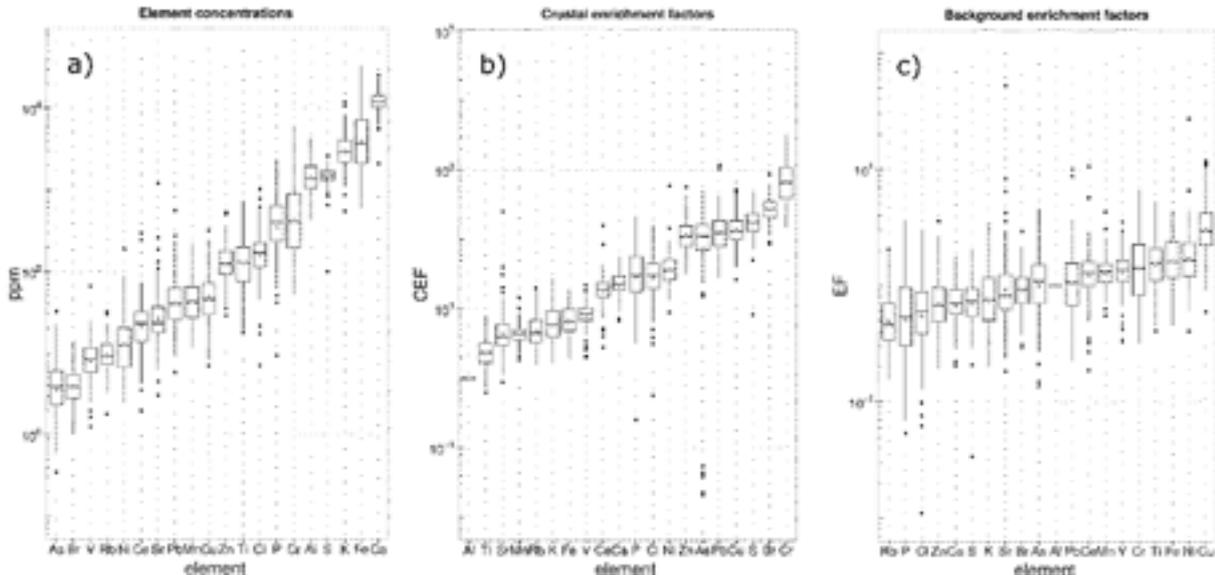
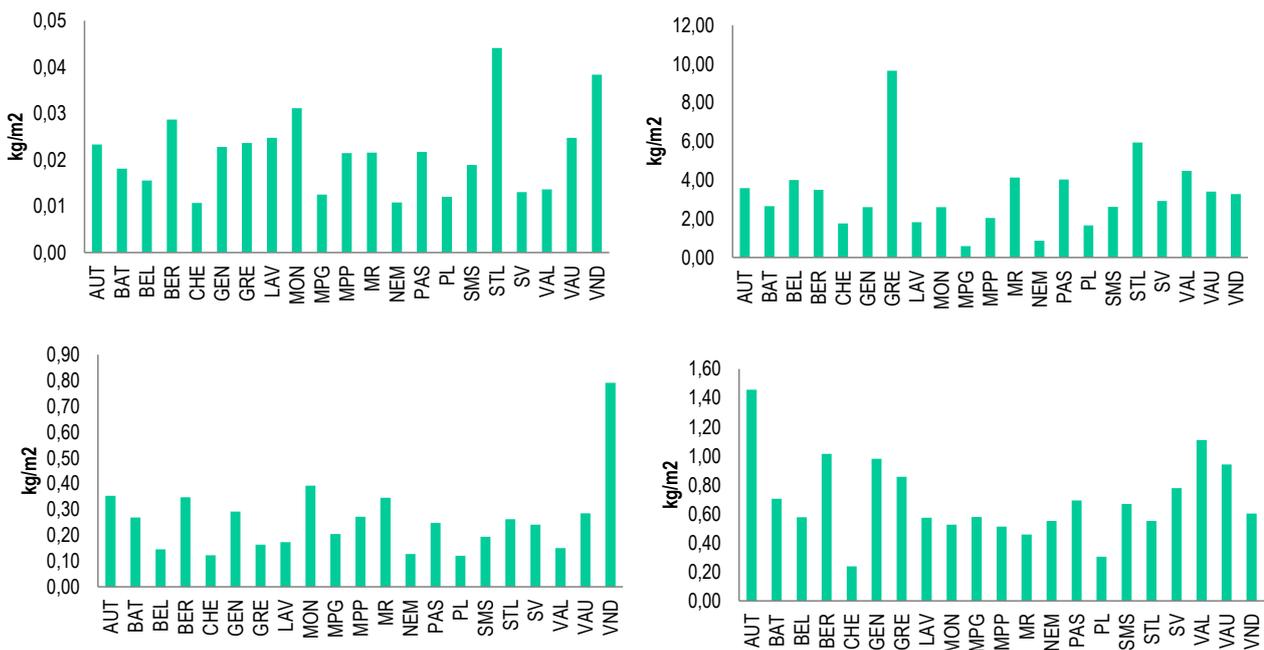
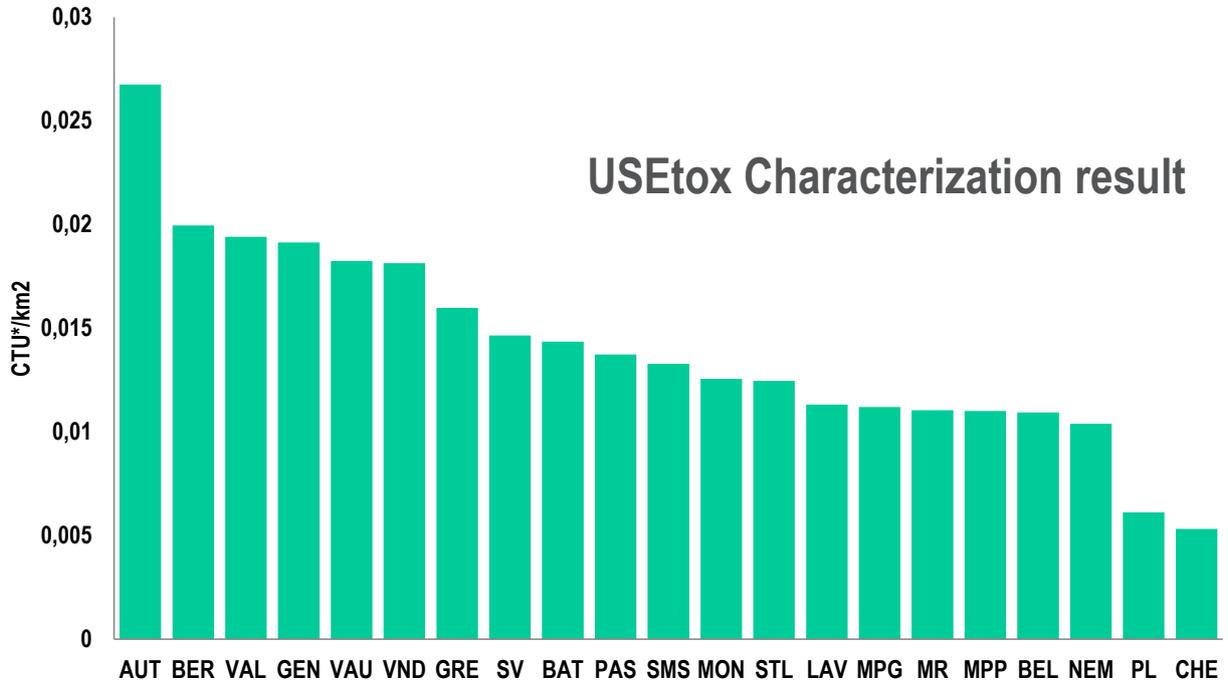


Figure 1. Box-and-whisker plot of: a) ordered elements concentration (ppm) in all moss samples at regional scale; b) ordered crustal enrichment factors in all moss samples at regional scale computed with respect to Al (left end) taking the average composition of the upper continental crust as reference; c) ordered background enrichment factors in all moss samples at regional scale taking Al (at center) as normalization element and comparing the element ratios to the ones of background site NEM. The range and 25th percentile/median/75th percentile box are shown for all plots. Extreme values are given and plotted as full diamonds.

Case of city of PARIS: Trace metal data from the samples (20 elements)



Case of city of PARIS: Trace metal data from the samples (20 elements)

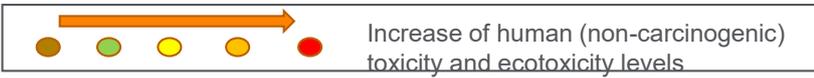


Case of city of PARIS: Toxicity Footprint



The order is showing an increase in significance of each element in the total (human and eco) toxicity levels (CTU\*/km2 unit)\*\*

Pb → V → As → Cr → Cu  
→ Zn





19

### Urban system and toxicity footprint



Research Article

Received 8 November 2019; Revised 17 February 2021; Accepted Article published 21 February 2021; Published online in Wiley Online Library 21 March 2021

wileyonlinelibrary.com DOI: 10.1002/jfa.1149

## Integration of life cycle assessment and regional emission information in agricultural systems

Junbeum Kim,<sup>a,b</sup> Albina Yalaltidnova,<sup>b</sup> Natalia Sirina<sup>a</sup> and Natalia Baranovskaya<sup>b</sup>

**Abstract**

**BACKGROUND:** Life cycle assessment (LCA) is a compilation and evaluation of the input energy and materials, output emissions and the potential environmental impacts of a product, service or system throughout its life cycle. While methodological issues of LCA are still being developed, much research is being conducted worldwide in order to improve them. One of the important advances in LCA is a regionalised LCA, i.e. the development of regionalised databases, inventories, and impact assessment methods and models.

**RESULTS:** Regional emission information (REI) was developed and integrated with the characterisation results in LCA of an agricultural product in the study area. Comparisons of outcomes obtained with LCA characterisation results that did not include REI shows that the characterisation results taking REI into account are much higher as regards human toxicity, from 0.52% to 6.36%, freshwater ecotoxicity from 89% to 99% and terrestrial ecotoxicity from 8.88% to 26.17%.

**CONCLUSIONS:** Results of current LCA studies on agricultural products and systems that do not include REI are under-estimating the life cycle environmental impact. For the LCA of agricultural products and systems, the REI as well as regionalised life cycle inventory data should be developed and integrated into the current LCA approach.

© 2015 Society of Chemical Industry

Supporting information may be found in the online version of this article.

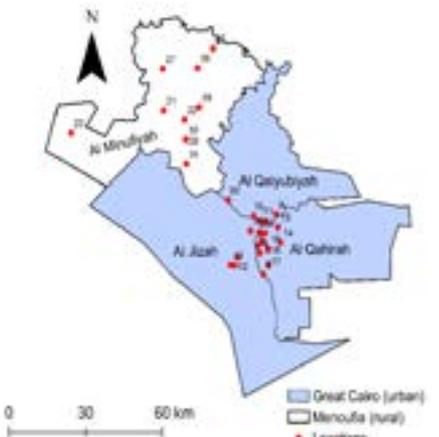
**Keywords:** life cycle assessment (LCA); human toxicity and ecotoxicity; regional emission information (REI); inventories; fuzzy metal emissions



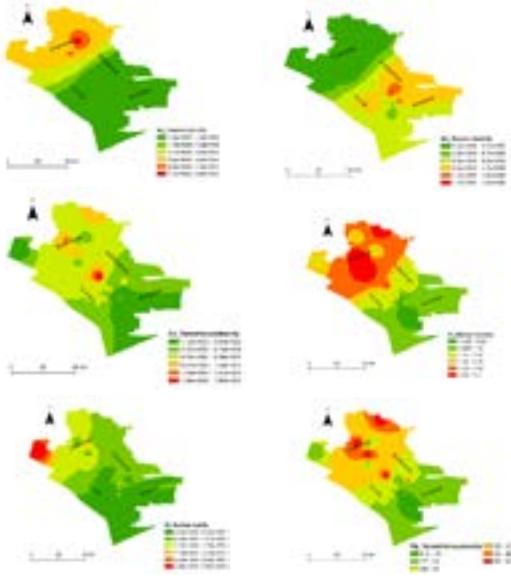
중금속 독성발자국 평가<sup>20</sup>

### Urban system and toxicity footprint

Current study: Monitoring of air pollutants using plants and co-located soil - Egypt: characteristics, pollution, and toxicity impact (Environmental Science and Pollution Research, 2021)  
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17218-7>

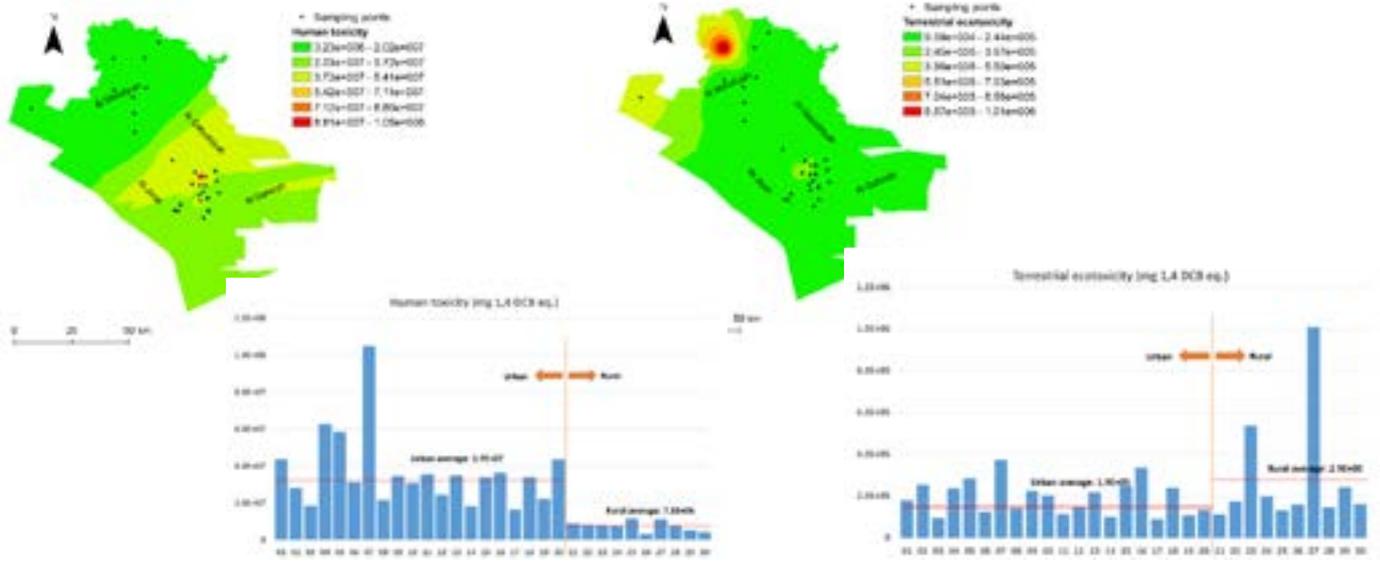


Element	Greater Cairo (HS)	Minoufia Governorate (H1)
Na	6143 ± 960	11838 ± 1186
Mg	14672 ± 1869	24078 ± 3506
Al	24760 ± 3389	43078 ± 6459
S	445900 ± 10555	325466 ± 20813
Cl	3751 ± 1333	8179 ± 3376
K	6678 ± 527	10553 ± 1043
Ca	37350 ± 3145	37067 ± 3943
Sc	8 ± 2	17 ± 3
Ti	4477 ± 694	7862 ± 1305
V	85 ± 14	129 ± 23
Cr	50 ± 6	85 ± 8
Mn	472 ± 72	1007 ± 101
Fe	27846 ± 4727	75389 ± 9948
Co	12 ± 2	25 ± 4
Ni	32 ± 6	52 ± 6
Zn	129 ± 33	79 ± 13
As	2.9 ± 0.3	4.3 ± 0.4
Br	7 ± 1	10 ± 1
Ba	21 ± 3	39 ± 5
Sr	204 ± 21	296 ± 16
Zr	159 ± 20	264 ± 29
Pb	0.5 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Sh	1.5 ± 0.3	1.5 ± 0.3
Cd	0.6 ± 0.1	1.1 ± 0.2
Ba	374 ± 63	206 ± 32
La	13 ± 2	22 ± 3
Ce	30 ± 4	64 ± 10
Hf	10 ± 1	21 ± 4
Sn	5 ± 1	6 ± 1
Eu	0.7 ± 0.1	1.4 ± 0.2
Gd	0.5 ± 0.1	1.3 ± 0.6
Tb	0.4 ± 0.1	0.7 ± 0.1
Dy	3.4 ± 0.3	4 ± 1
Ho	4 ± 1	2.8 ± 0.3
Er	7 ± 1	7 ± 1
Ta	0.7 ± 0.1	1.3 ± 0.2



□ Urban system and toxicity footprint

Current study: Monitoring of air pollutants using plants and co-located soil - Egypt: characteristics, pollution, and toxicity impact (Environmental Science and Pollution Research)



2010년 토양측정망 위치 (38 곳)

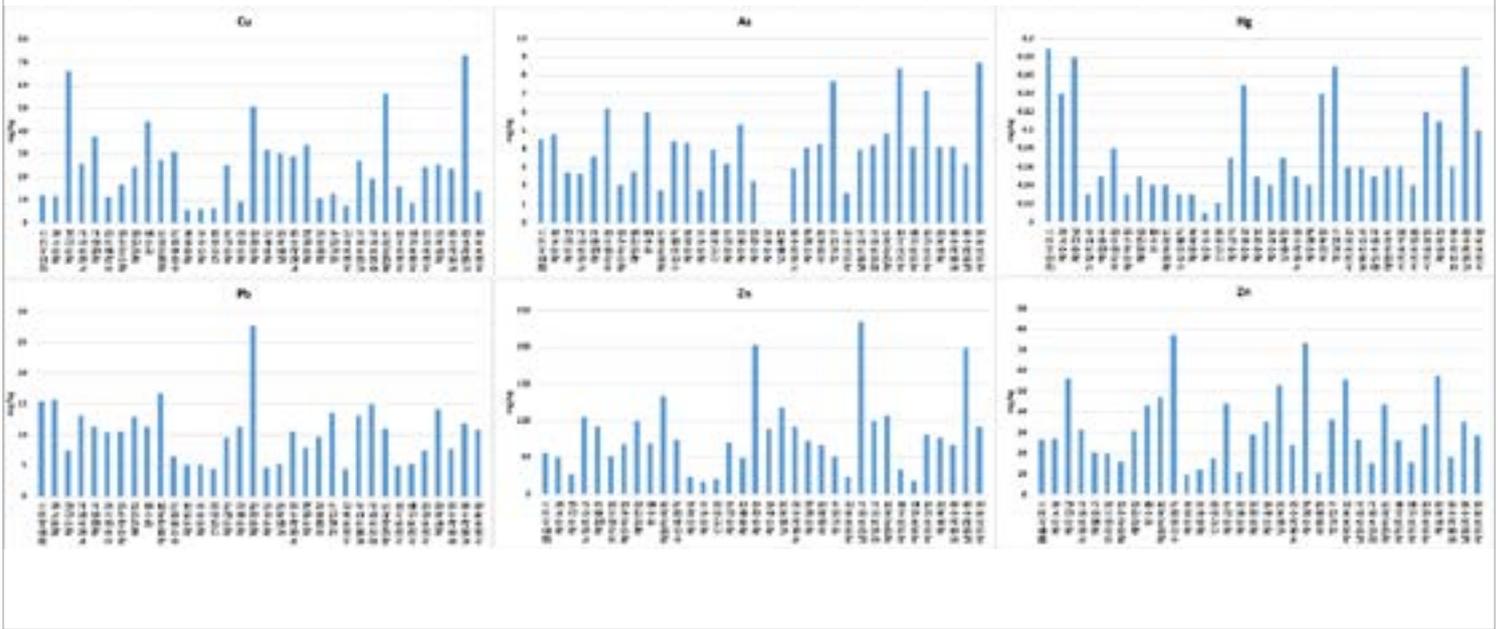


- 애월초등교
- 중앙초등교
- 노형초등교
- 제주북교
- 이시돌목장
- 남읍목장
- 고수목마
- 송당목장
- 광령도로
- 한림도로1
- 현대학원
- 제주공항
- 오라골프장
- 제주골프장
- 제주야구장
- 해양연립
- 한수플
- 제원아파트
- 수산유원지
- 노형과수원(감귤)
- 관음사코스
- 한경전
- 신산공원
- 남원초등교
- 서귀북교
- 제동목장
- 하원목장
- 동하목장
- 중문골프장
- 국민생활관
- 동남아파트
- 에덴아파트
- 돈내코
- 토평과수원
- 동홍과수원
- 남원과수원
- 영실입구
- 성읍전

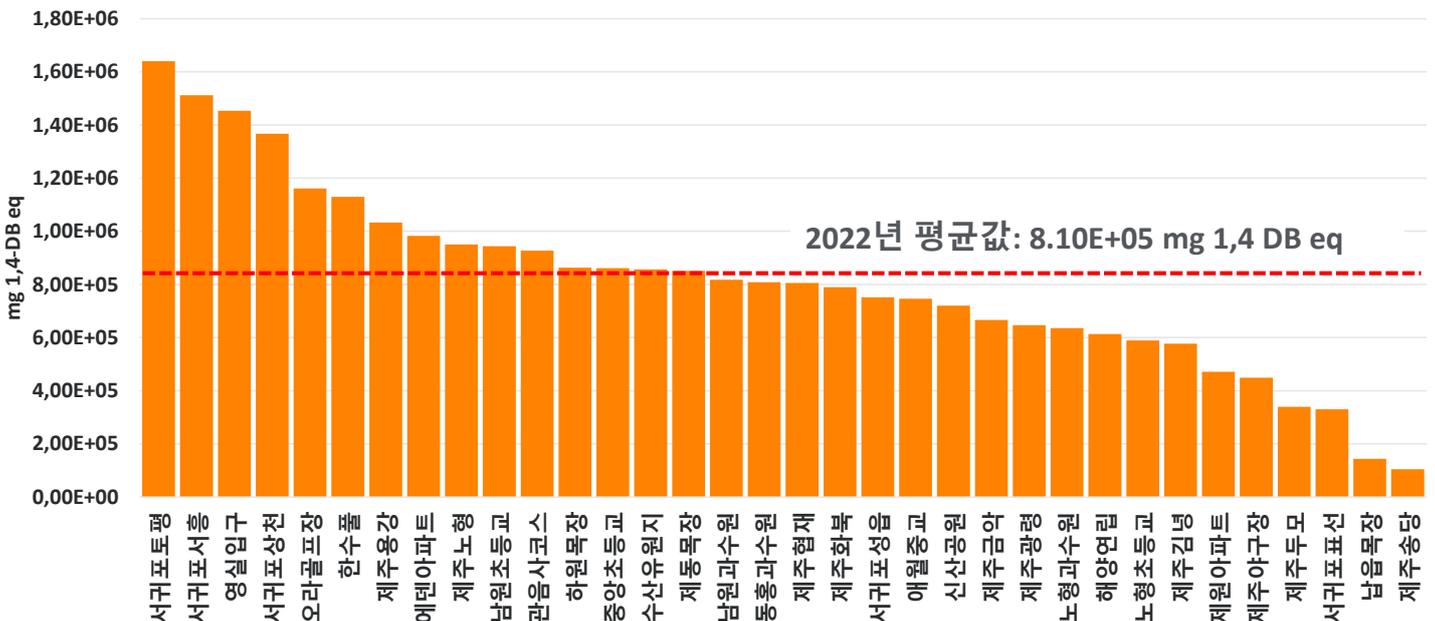
2022년 토양측정망 위치 (34 곳)

- 관음사코스
- 제주노형
- 제주김녕
- 노형초등교
- 애월중교
- 오라골프장
- 제주야구장
- 해양연립
- 한수플
- 제원아파트
- 수산유원지
- 제주화북
- 제주두모
- 신산공원
- 제주금악
- 제주용강
- 제주광령
- 제주송당
- 남읍목장
- 노형과수원
- 제주협재
- 하원목장
- 영실입구
- 서귀포표선
- 남원초등교
- 중앙초등교
- 에덴아파트
- 서귀포서흥
- 서귀포성읍
- 서귀포상천
- 제동목장
- 동홍과수원
- 남원과수원
- 서귀포토평

□ 2022년 토양측정망 위치 (38 곳)



2022년 제주도 토양자료를 바탕으로 한 인간독성발자국

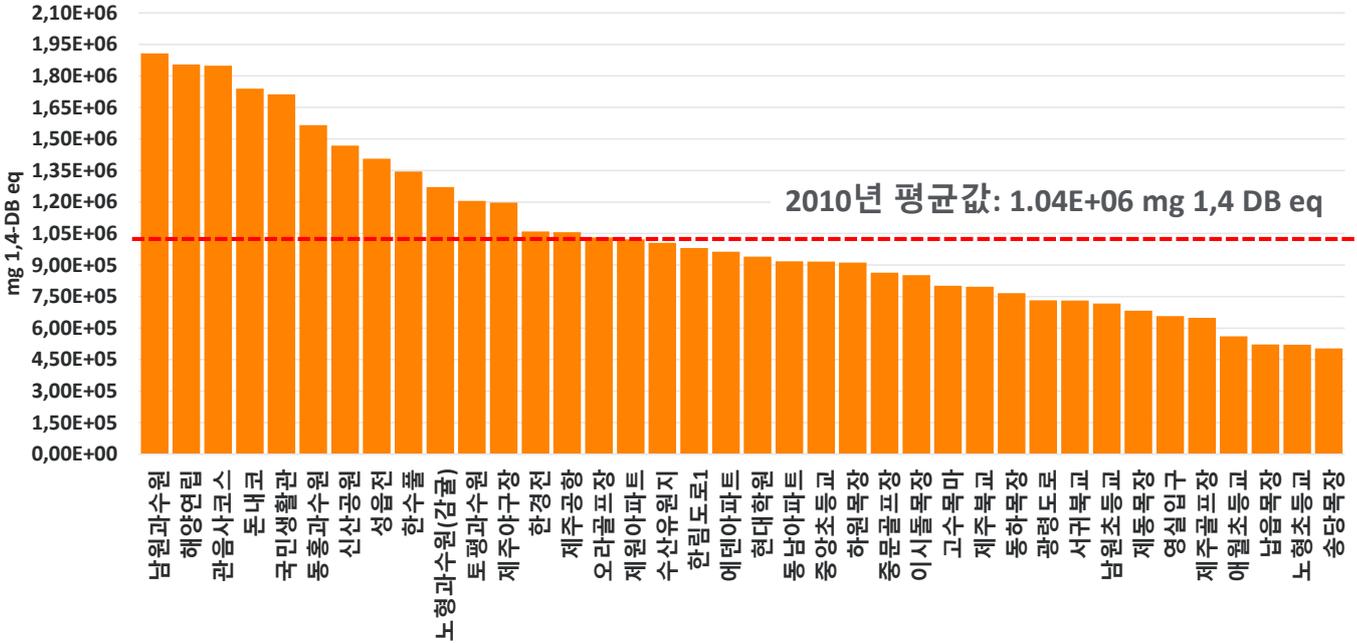




토양중금속 자료를 활용한 독성발자국

25

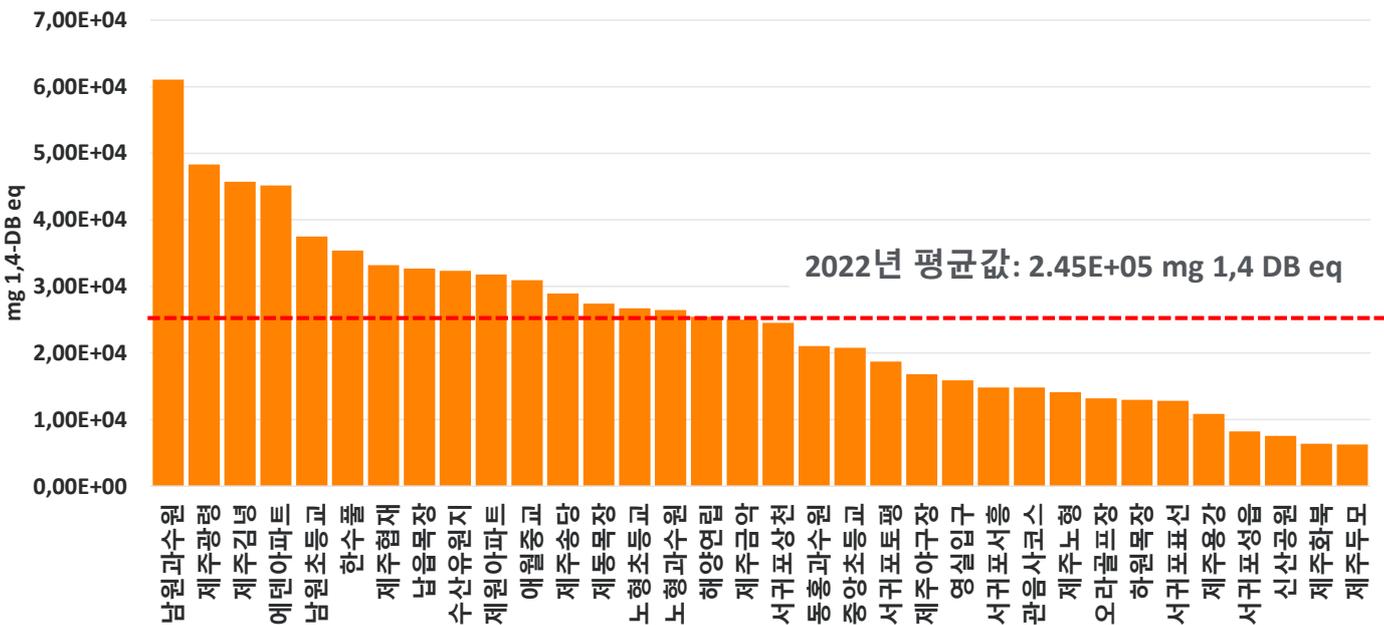
2010년 제주도 토양자료를 바탕으로 한 인간독성발자국



토양중금속 자료를 활용한 독성발자국

26

2022년 제주도 토양자료를 바탕으로 한 생태독성발자국

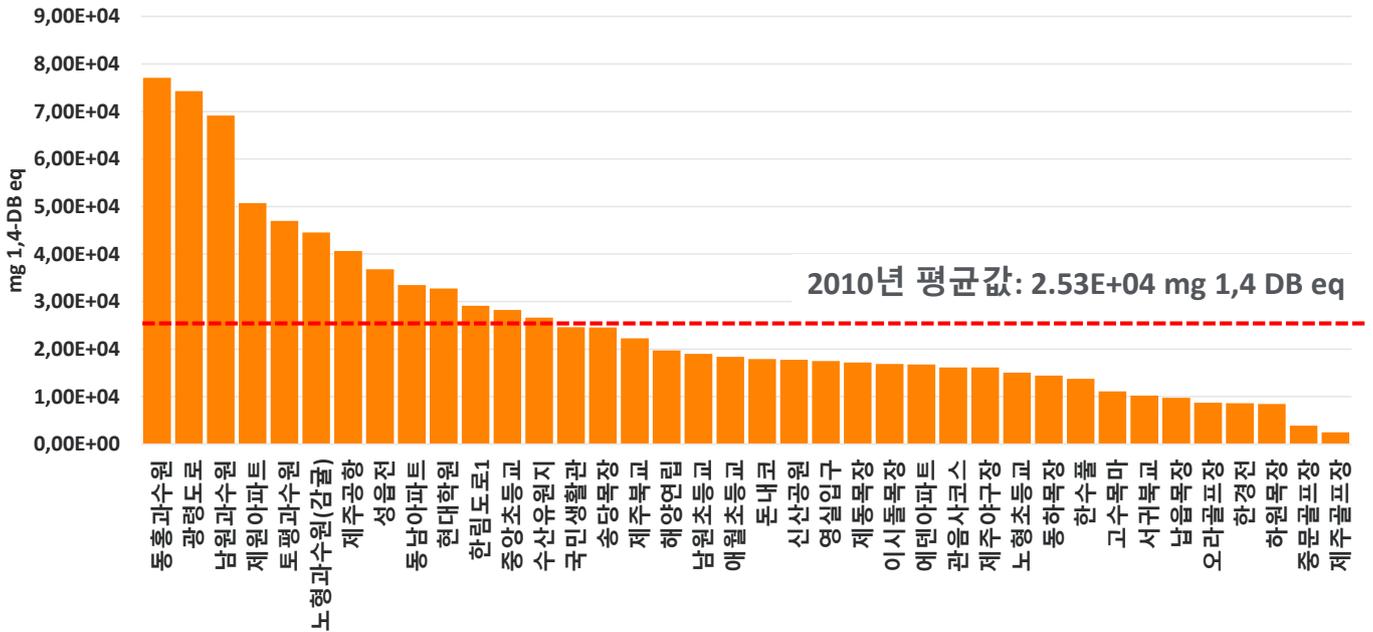




토양중금속 자료를 활용한 독성발자국

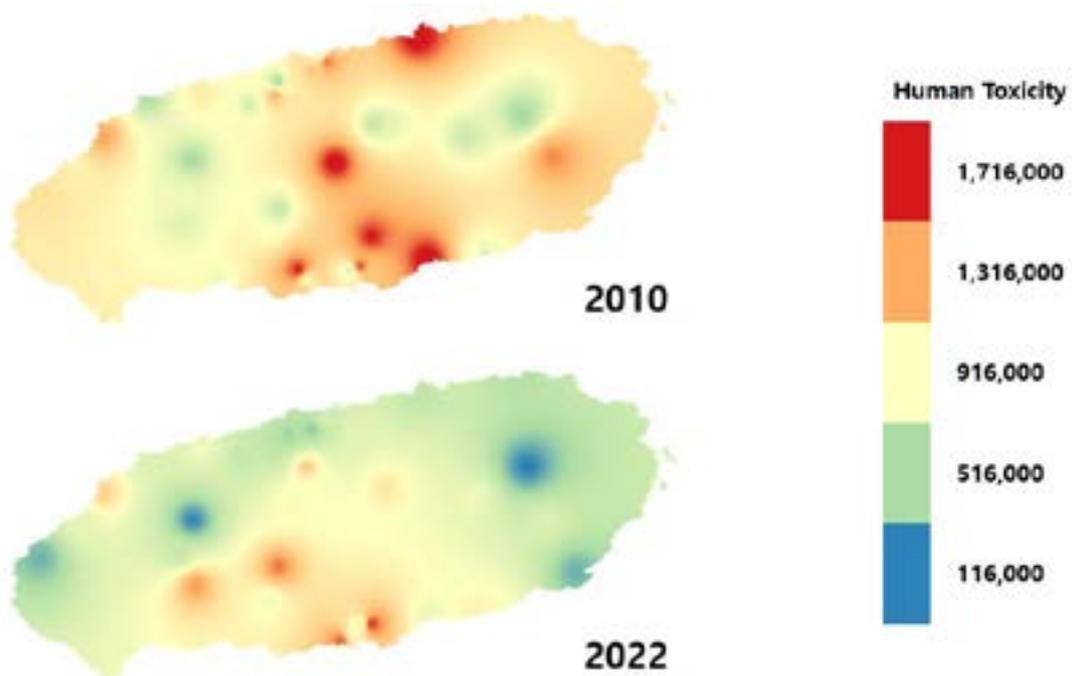
27

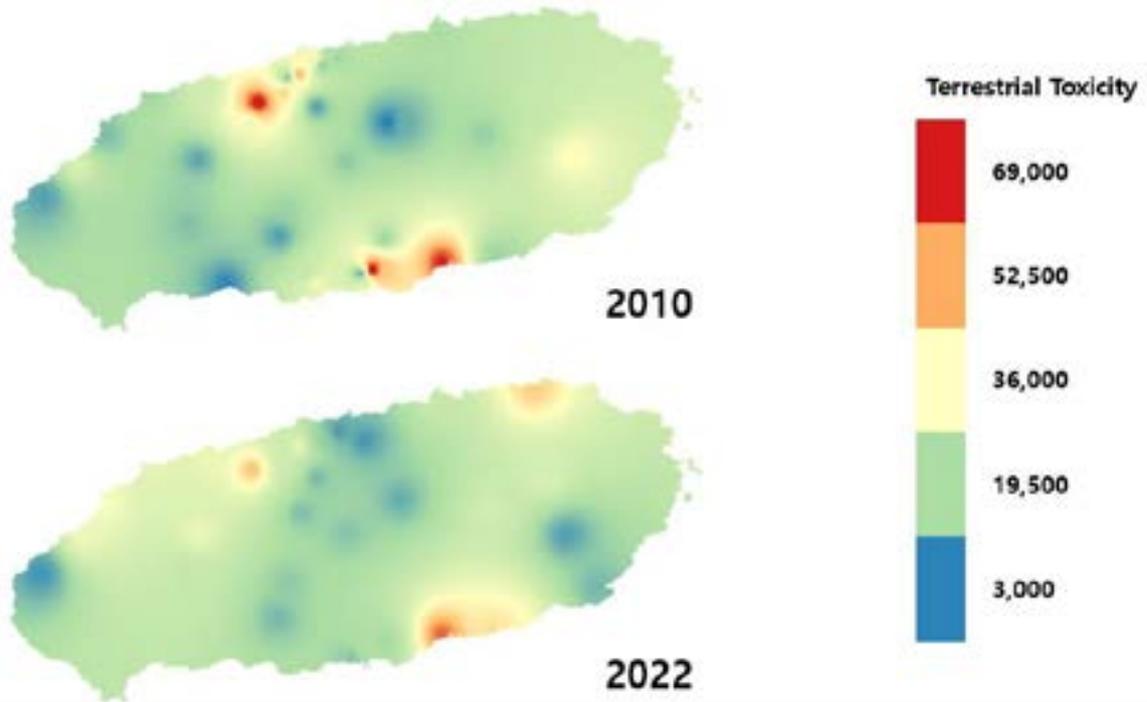
2010년 제주도 토양자료를 바탕으로 한 생태독성발자국



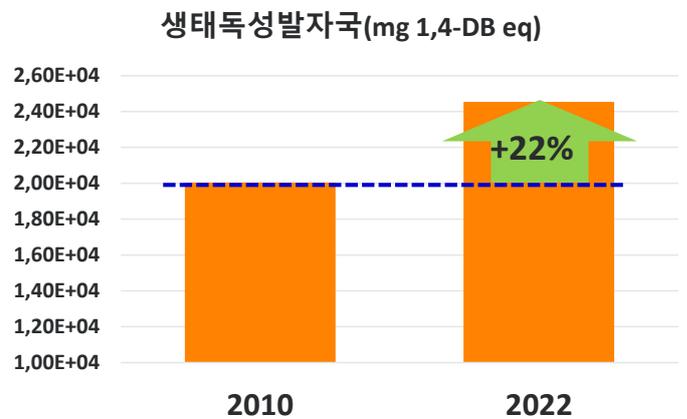
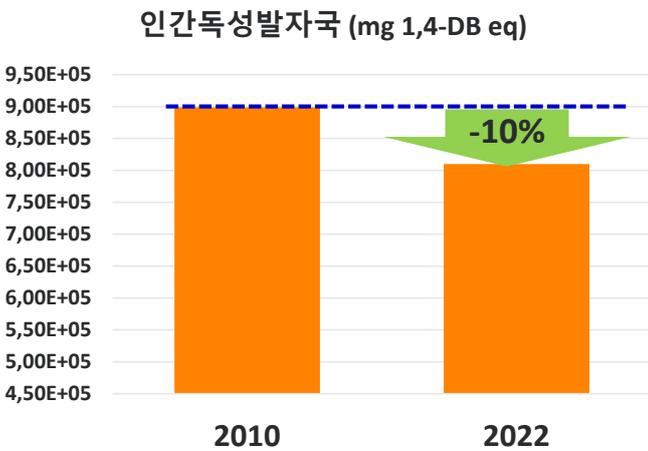
토양중금속 자료를 활용한 독성발자국

28



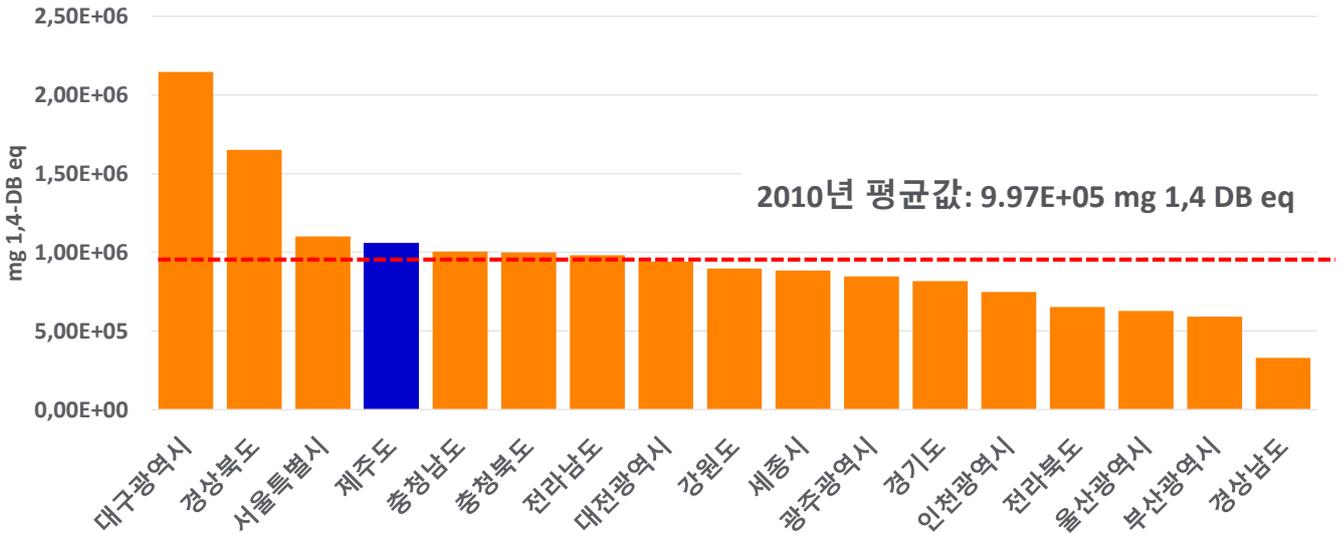


□ 제주도 2010 & 2022년 인간독성발자국 및 생태독성발자국 비교



□ 국내 지자체에서의 인간독성발자국 비교 (2010)

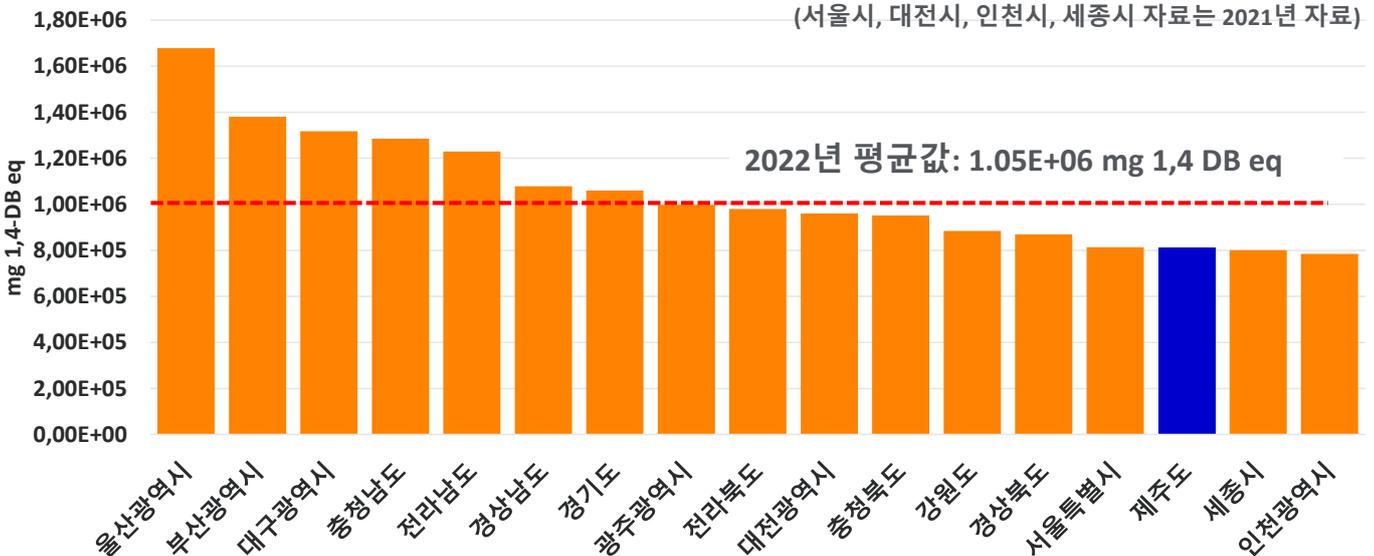
2010년 국내 지자체에서의 인간독성발자국



□ 국내 지자체에서의 인간독성발자국 비교 (2022)

2022년 국내 지자체에서의 인간독성발자국

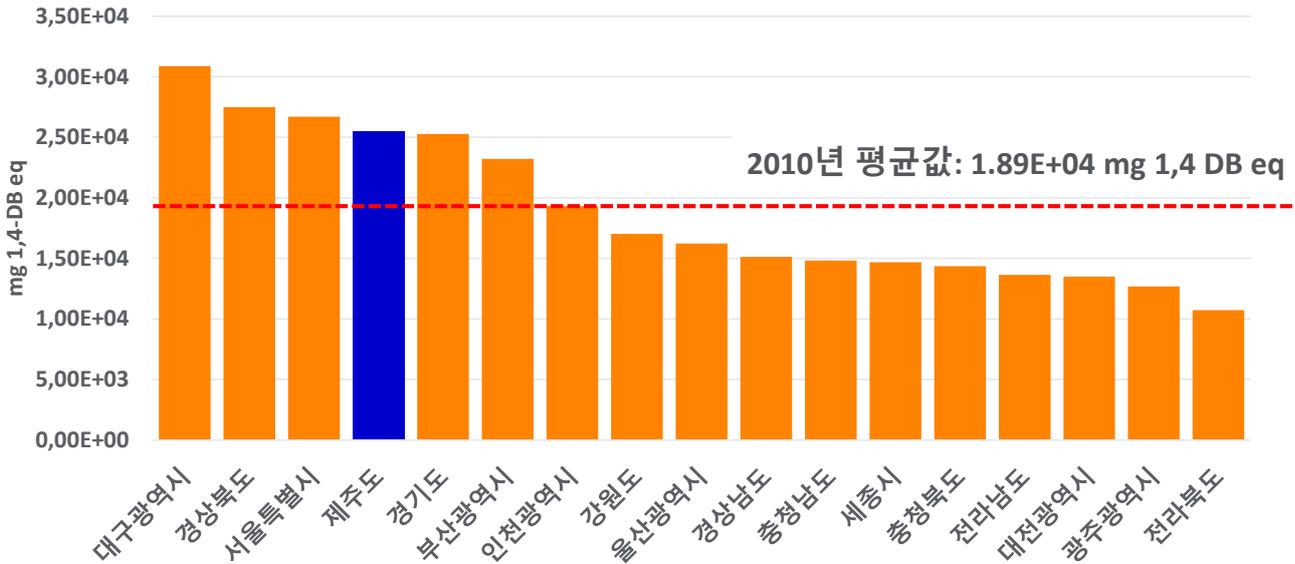
(서울시, 대전시, 인천시, 세종시 자료는 2021년 자료)





□ 국내 지자체에서의 생태독성발자국 비교 (2010)

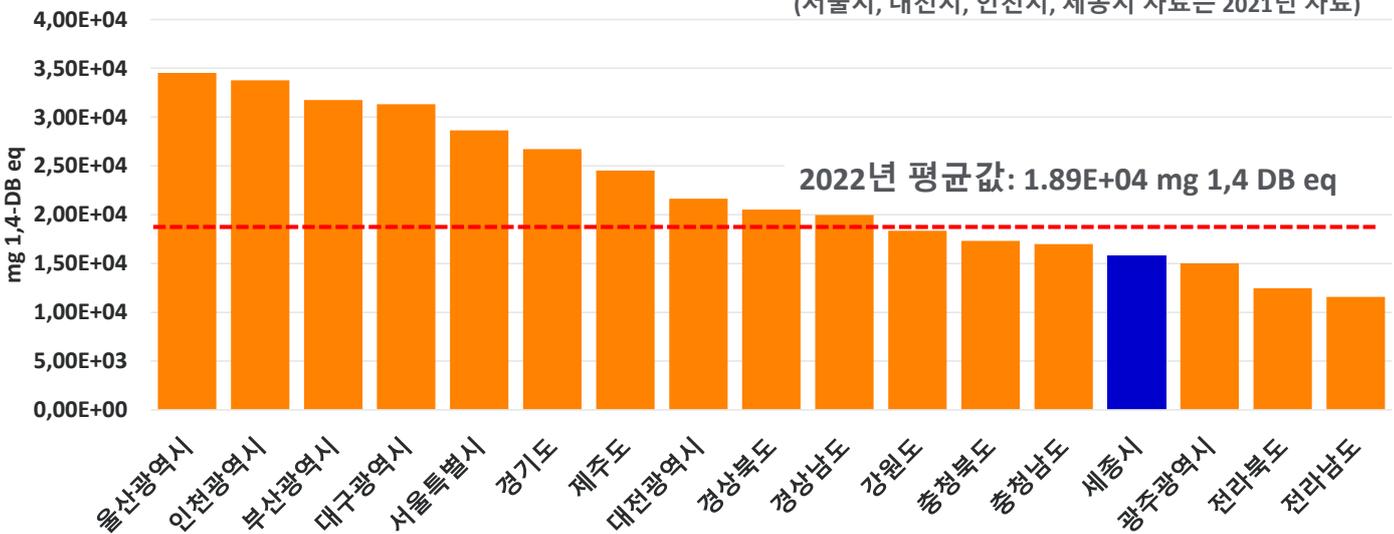
2010년 국내 지자체에서의 생태독성발자국



□ 국내 지자체에서의 생태독성발자국 비교 (2022)

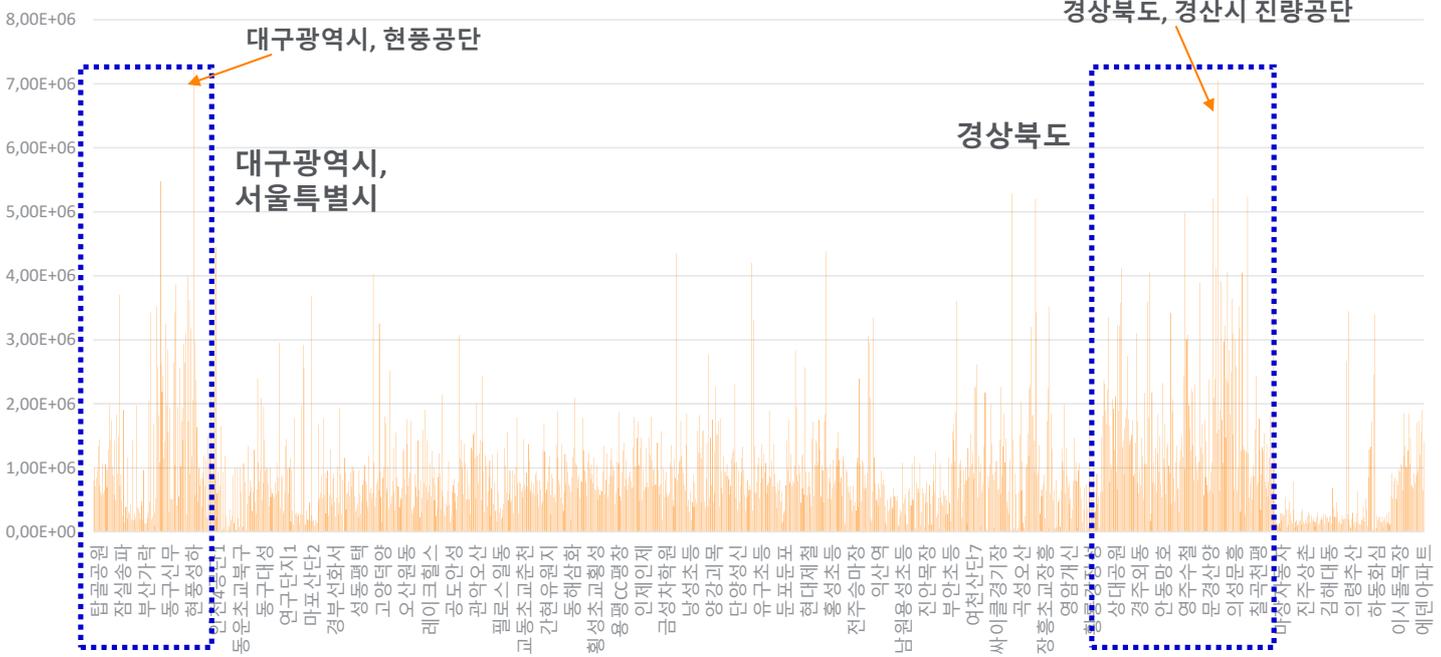
2022년 국내 지자체에서의 생태독성발자국

(서울시, 대전시, 인천시, 세종시 자료는 2021년 자료)

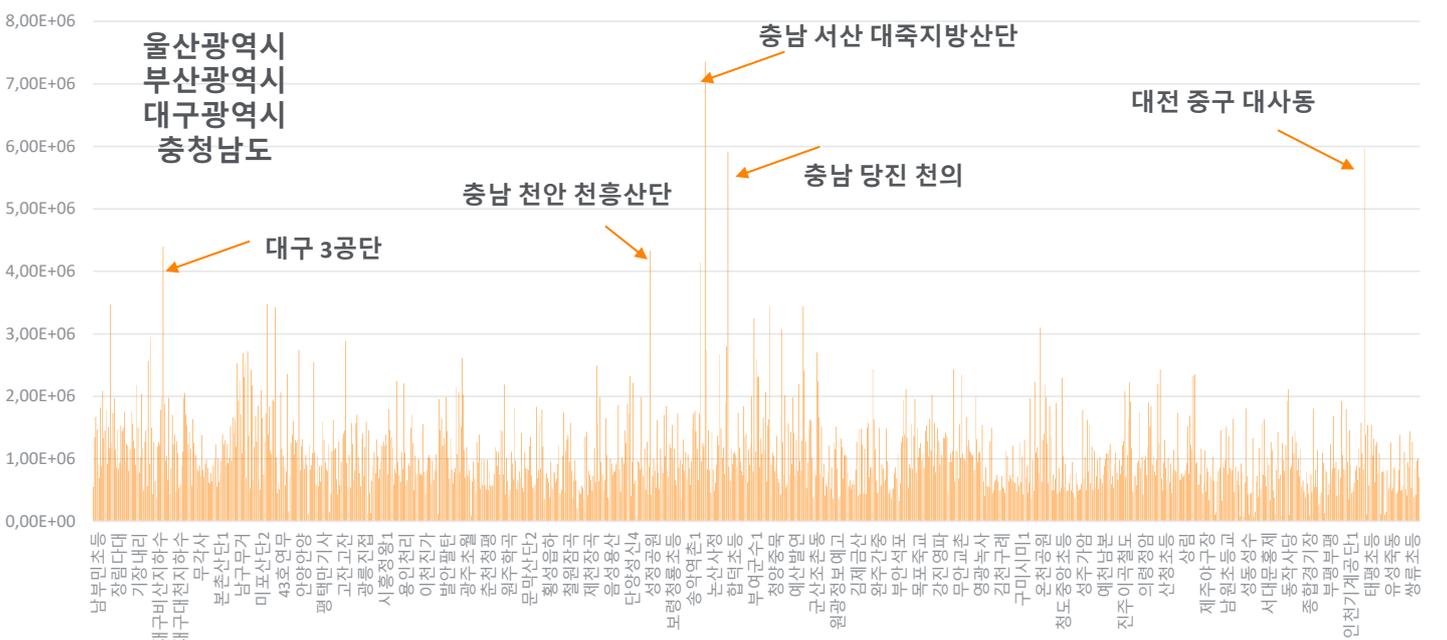




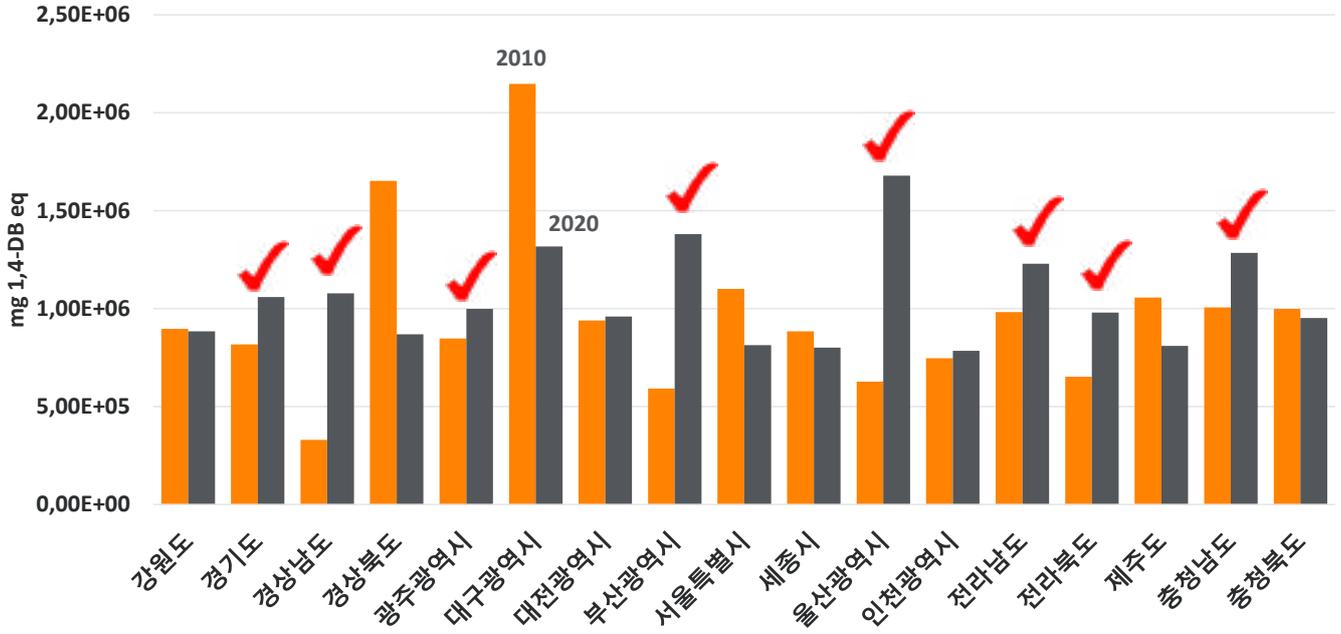
□ 국내 지자체에서의 인간독성발자국 비교 (2010), mg 1,4-DB eq (1519 측정망)



□ 국내 지자체에서의 인간독성발자국 비교 (2022), mg 1,4-DB eq (1163 측정망)



□ 국내 지자체에서의 인체독성발자국 비교 (2010 & 2022)



- 국내에서도 탄소발자국, 물발자국 등의 개념과 같이 미세먼지 발자국, 독성발자국 개념 제시 및 지속적인 적용과 활용이 필요함
- 토양측정망 DB가 정기적으로 잘 구축되어져 오고 있지만 대표성을 가질 수 있도록 지점을 더 확충해 나가야함
- 제주도에서의 인간독성발자국은 2010년에 비해 2022년에는 10% 감소가 있었지만, 생태독성발자국은 22% 증가하였음
- 지자체 비교결과에서도 2010년도에서는 전국 평균보다 높게 4번째로 높은 인간 및 생태독성발자국 결과값을 가졌지만 2022년도에는 평균보다 낮은
- 토양 자료를 바탕으로한 인간독성 및 생태독성발자국 결과를 바탕으로 토양중금속 배출원인 규명과 중금속 발생 저감을 위한 여러 방안들 제시가 필요함