

민감도 분석을 이용한 연안환경 화학물질 모델링의 영향인자 평가

노경준 · 김동명*

국립부경대학교 생태공학전공

Assessment of Influential Factors of Hazardous Chemicals Modeling in Coastal Environment Using Sensitivity Analysis

Kyong Joon Roh and Dong-Myung Kim*

Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

Based on the sensitivity analysis conducted during the modeling of hazardous chemicals in coastal environments, of influential factors and key processes were ranked based on chemical type, model type, and state variables. Advection and diffusion were found to have significant influences on the dissolved chemicals. For chemicals in particulate organic matter, the most influential factors has the following order: the partition coefficient of particulate organic carbon, adsorption rate, and settling velocity. It is also necessary to conduct a sensitivity analysis of the desorption rate in future studies. For chemicals in phytoplankton, the bioconcentration factor was the most critical parameter, and future studies should include a sensitivity analysis of the excretion rate. For polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), both the photolysis rate constant and dissipation rate were identified as key influencing factors.

Keywords: Hazardous chemicals modeling, Coastal environment, Sensitivity analysis

서론

POPs (persistent organic pollutants), EDCs (endocrine disrupting chemicals), PBTs (persistent bio-accumulative and toxic substance) 등과 같은 유해 화학물질에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다. 하지만, 독성(toxicity), 잔류성(persistence), 생물축적성(bioaccumulation), 장거리 이동성(long-range transport) 등의 특징을 가지고 있는 이러한 물질들에 의한 해양 생태계의 오염은 점점 더 복잡하고 다양하게 나타나고 있으며, 이로 인해 인간의 건강과 생태계에 돌이킬 수 없는 피해를 초래할 가능성이 점차 커지고 있다(Kim et al., 2004; Kim, 2011b). 해양생태계로 유입되는 화학물질에 대한 종합적인 평가와 효과적인 관리를 위해서는 해당 물질의 해양환경 내에서의 거동과 운명, 생태계에 미치는 영향, 관리 방안에 따른 농도 변화 예측, 노출량의 시공간적 변동 및 이에 따른 위해성 평가 등이 필요하다. 이러한 평가를 수행하기 위해서는 화학물질에 대한 생태계 모델이 유용한 도구가 될 수 있으며, 특히 자연환경을 대상으로 직접 실험이 어려운 경우에 모델은 효과적인 대안으로 활용될

수 있다(Kim et al., 2004).

연안환경을 대상으로 다이옥신류, PFCs (perfluorinated compounds)의 일종인 PFOA (perfluorooctanoic acid)와 PFOS (perfluorooctanesulfonic acid), PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons)와 같은 유해화학물질 모델링에 대한 연구가 진행되고 있다(Kim, 2007, 2011a, 2011b, 2016; Kim et al., 2011; Heo et al., 2020). 모델링연구가 진행된 화학물질 중 다이옥신류(PCDD/DFs)는 비의도적으로 생성되는 독성 유기오염물질로, 다이옥신(polychlorinated dibenzo-para-dioxins, PCDDs) 75종과 퓨란(polychlorinated dibenzoFurans, PCDFs) 135종의 이성체를 포함한 총 210종의 화합물을 통칭한다. 이들 물질은 화합물 자체의 독성(toxicity), 잔류성(persistence), 장거리 이동성(long range transport) 등의 특성으로 인해 인간의 건강과 생태계에 유해한 영향을 미치는 물질로 간주된다(Fiedler, 1996). 특히 다이옥신은 내분비계교란물질(endocrine disrupting chemicals, EDCs) 중에서도 우선적으로 관리가 필요한 화학종으로, 다양한 동물 실험과 사고 사례를 통해 발암성, 성호르몬 변화, 면역 기능 저하, 간 손상, 갑상선 기능 저하, 피부질

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 6545 Fax: +82. 51. 629. 6538

E-mail address: dmkim@pknu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0463>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 463-469, August 2025

Received 16 June 2025; Revised 24 June 2025; Accepted 24 June 2025

저자 직위: 노경준(강사), 김동명(교수)

환 유발 등의 유해성이 보고되고 있다(Mocarelli et al., 1991).

PBTs 물질군인 PFCs는 계면활성제, 표면처리제, 부식방지제, 오염 및 얼룩방지제, 소화용 거품, 식품 포장재, 프라이팬 코팅제 등 다양한 제품에 사용되고 있다. PFCs의 대표적인 최종 분해산물인 PFOA는 동물내의 간세포독성과 치사율에 매우 큰 영향을 주는 물질로 환경 중 잔류성이 강하고, 신체발달 및 생식 기능상 매우 높은 위험성을 유발시키며 먹이사슬을 통해 인간과 생태계에 농축되어 악영향을 미치는 독성이 강한 물질이다(OECD, 2002; US EPA, 2003). PFOS는 2002년 다이옥신 학회에서 새로운 잔류성 유기오염물질(POPs)로 소개되었으며, 2009년 5월 스위스 제네바에서 열린 스톡홀름 협약 제 4차 당사국 총회에서 POPs물질로서 관리대상으로 부속서에 새롭게 등재되었다.

PAHs는 탄소와 수소로 이루어진 화학물질 중에서 5-6개의 탄소원자가 모여 만들어진 벤젠고리 형태가 최소한 2개 이상 결합되어 있는 화합물이고, 주로 화석 연료의 불완전 연소에 의해 유발되는 발암성 화합물이다(Eisler, 1987). 화석연료를 사용하는 인간활동에서 발생하는 산업폐수 및 도시하수와 하천을 통한 바다로의 유입, 선박의 유류오염사고에 의한 바다로의 직접 유입 그리고 대기에서 바다로의 유입이 PAHs 화합물에 의한 해양오염의 근원에 많은 부분을 차지하는 물질이다(Tolosa et al., 1996; Lipiatou et al., 1997).

각 연구별로 적합하다고 판단되는 프로세스를 모델에 적용하였고 모델링 결과에 따른 영향인자를 산출하였지만, 적용사례의 부족으로 화학물질별, 시뮬레이션 모델별 적용된 프로세스와 영향인자에 대한 종합적인 평가는 수행되지 않았다. 각 연구에서 적용된 화학물질과 영향인자는 Table 1에 나타난 바와 같다. 본 연구에서는 모델링시 수행하는 민감도 분석을 바탕으로 화학물질, 모델 타입, 상태변수에 따른 영향인자 순위와 프로세스를 평가하고 후속 연구시 고려해야할 요소를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

유해물질 모델링시 대상이 된 화학물질의 종류, 사용한 모델의 유형 및 특징, 수평방향 및 수심방향 해상도, 적용된 프로세스의 종류, 상태변수의 유형을 분석하였다.

유해물질 모델링시 시뮬레이션 된 수치를 현장에서 관측된 수치와 비교하는 보정과정을 수행하게 되며, 보정된 값을 바탕으로 민감도 분석을 수행하게 된다. 모델 보정에 적용된 계수값에 대하여 각 계수값을 증감시켰을 때 나타나는 상태변수 결과값의 변동량으로 계수의 민감도를 분석하여 상태변수의 농도결정에 미치는 영향을 분석한다. 각 계수값의 2배 및 1/2배에 해당하는 값으로 증감시켰을 때 나타나는 상태변수 결과값을 분석하여 화학물질별, 상태변수별, 적용모델별 영향인자를 산정한다.

$$\text{Sensitivity of state variable (\%)} = (B-A)/A \times 100$$

여기서 A는 보정시 계산된 각 상태변수의 수치이며 B는 계수의 증감에 따라 바뀌어 산출된 상태변수의 수치이다.

결 과

모델링 프로세스와 상태변수

본 연구에서 사용한 모델링 사례를 Table 1에 나타내었다. 적용된 화학물질은 dioxins와 PFCs인 PFOA와 PFOS 그리고 PAHs이다. 3차원 미세격자 생태계 모델인 EMT-3D의 적용이 더 많았으며 멀티박스 모델이 적용된 경우도 있었다. EMT-3D가 적용된 경우 수평방향 해상도는 200-1,000 m였으며 수심방향으로는 5-10개의 층으로 구분되어 시뮬레이션 되었다. 멀티박스 모델의 경우는 수평방향으로는 1-2개의 박스로, 수심방향으로는 한 개의 동일한 층으로 구성되어 시뮬레이션 되었다.

적용된 프로세스는 식물플랑크톤의 생물농축 및 섭취와 분비, 입자성 유기물의 흡착 및 탈착과 분배, 입자의 침강을 고려하였

Table 1. Target regions, chemicals, state variables and applied processes for sensitivity analysis in hazardous chemicals modeling

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Target area	Ulsan Bay	Gwangyang Bay	Tokyo Bay	Gwangyang Bay	Jinhae Bay	Masan Bay
Target chemical	Dioxins	PFOA	PFOA	PFOS	PAHs	PAHs
Applied model	EMT-3D	EMT-3D	EMT-3D	Mult box	EMT-3D	Mult box
Model type	3-D fine grid	3-D fine grid	3-D fine grid	Two boxes, one layer	3-D fine grid	One box, one layer
Vertical layer	5	5	10	1	5	1
Reference	Kim (2011b)	Kim (2016)	Kim (2007)	Heo et al. (2020)	Kim (2011a)	Kim et al. (2011)
State variables	Chemicals in water, chemicals in particulate organic matter, chemicals in phytoplankton					
Applied factor for sensitivity analysis	Bioconcentration factor of phytoplankton, uptake rate of phytoplankton, excretion rate of phytoplankton, adsorption rate of organic particulates, desorption rate of organic particulates, partition factor of organic particulates, sinking velocity of particulate matter, photolysis rate (Case5, Case 6), extinction coefficient (Case 5)					

PFOA, Perfluorooctanoic acid; PFOS, Perfluorooctanesulfonic acid; PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons.

고 PAHs의 경우 광분해와 소산계수를 추가로 고려하였다. 시물레이션한 상태변수는 용존화학물질, 입자성유기물내의 화학물질, 식물플랑크톤 체내의 화학물질이 계산되었다.

용존화학물질의 민감도 분석

용존화학물질에 대한 민감도 분석결과를 Table 2에 나타내었으며, 그중 3차원 미세격자를 사용한 생태계 모델 적용시 분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 3차원 모델이 적용된 경우 울산만 용존 dioxins의 경우 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 따른 농도변화가 12.500% 및 -16.192%로 다소 크게 나타났다. 침강속도에 따른 농도변화가 8.872% 및 -12.623%로 나타났으며, 입자성 유기탄소에 대한 흡착 속도의 증감에 따라 -3.080% 및 2.081%의 농도변화가 나타났다(Case 1). Case 2와 Case 3인 광양만 및 도교만 용존 PFOA의 경우 분배계수와 침강속도의 증감에 따른 농도변화가 다소 있는 것으로 나타났으나, 그 변화량은 미미한 것으로 나타났다. Case 5인 진해만 용존 PAHs의 경우 광분해 계수의 증감에 따른 농도변화가 -11.120% 및 6.540%로 다소 크게 나타났다. 소산계수의 증감에 따른 농도변화가 -9.480% 및 6.370%로 나타났으며, 침강속도 및 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 대해서도 -2.940%에서 1.680%의 농도변화가 나타났다.

멀티 박스 모델이 적용된 광양만 용존 PFOS의 경우 흡착계수 변화에 따라 11.870% 및 -16.050%로 나타났으며, 탈착계수 증감에 따라 -16.230% 및 18.740%의 변화량을 나타내었다(Case 4). Case 6인 마산만 용존 PAHs의 경우 흡착 및 탈착 속도, 침강속도의 영향이 크게 나타났으며 광분해의 영향도 큰 것으로 나타났다.

용존 PFOA의 경우 이류 확산에 의한 영향이 클 것으로 판단되며, 용존 PFOS의 경우는 흡착 및 탈착과 침강등 입자와 관련된 영향이 있는 것으로 나타났다. PFCs계열인 PFOA와 PFOS의 거동이 다소 상이하게 나타난 것이 화학물질의 특성인지 대상해역을 하나의 층으로 고려하는 박스모델의 영향인지에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 용존 PAHs 경우 모델 형태에 관계없이 광분해 계수에 대한 영향을 나타내었으며 소산계수도 중요한 인자인 것으로 파악된다. 박스모델의 경우 입자와 관련된 계수의 영향이 크게 산정되는 경향을 나타냈다.

입자성유기물질중 화학물질의 민감도 분석

입자성유기물질중 화학물질에 대한 민감도 분석결과를 Table 3에 나타내었으며, 3차원 생태계 모델 적용시의 분석결과를 Fig. 2에 나타내었다.

3차원 모델이 적용된 울산만의 경우 입자성유기물질중 diox-

Table 2. Sensitivity analysis of dissolved chemicals concentration by change of values of parameters

Item		The changes of chemicals in water (%)					
		Dioxons Case 1	PFOA Case 2	PFOA Case 3	PFOS Case 4	PAHs Case 5	PAHs Case 6
Bioconcentration factor of phytoplankton	x1/2	0.456	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x2	-0.910	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
Uptake rate of phytoplankton	x1/2	0.001	0.000	0.000	-	0.000	-
	x2	-0.001	0.000	0.000	-	0.000	-
Excretion rate of phytoplankton	x1/2	-	-	-	0.000	-	-0.001
	x2	-	-	-	0.000	-	0.000
Adsorption rate of POC	x1/2	-3.080	-0.030	0.030	11.870	-0.010	34.903
	x2	2.081	0.010	-0.020	-16.050	0.000	-34.264
Partition coefficient of POC	x1/2	12.500	0.200	0.410	-	1.640	-
	x2	-16.192	-0.440	-0.760	-	-2.880	-
Desorption rate of POC	x1/2	-	-	-	-16.230	-	-34.969
	x2	-	-	-	18.740	-	40.162
Sinking velocity of particulate matter	x1/2	8.872	0.190	0.110	5.800	1.680	38.914
	x2	-12.623	-0.430	-0.210	-8.000	-2.940	-34.422
Photolysis coefficient	x1/2	-	-	-	-	6.540	11.471
	x2	-	-	-	-	-11.120	-17.107
Extinction coefficient	x1/2	-	-	-	-	-9.480	-
	x2	-	-	-	-	6.370	-

PFOA, Perfluorooctanoic acid; PFOS, Perfluorooctanesulfonic acid; PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; POC, Particulate organic carbon.

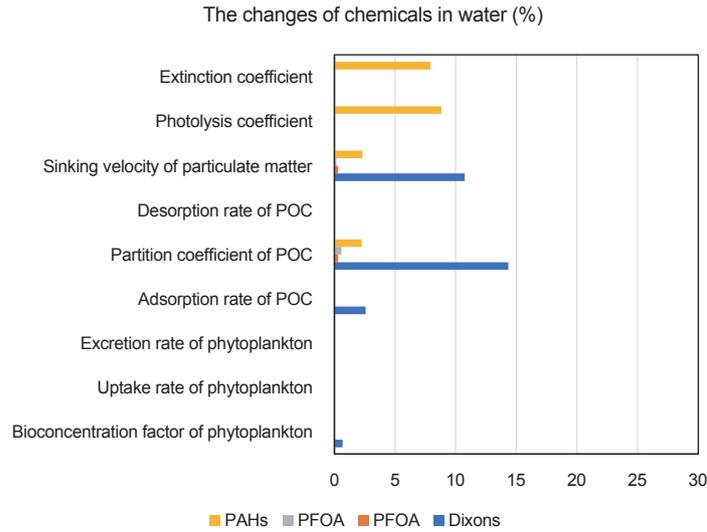


Fig. 1. Sensitivity analysis of dissolved chemicals concentration by 3-D fine grid ecosystem model. PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; PFOA, Perfluorooctanoic acid; POC, Particulate organic carbon.

ins는 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 영향이 큰 계수로 나타났으며, 다음으로는 침강속도,

입자성 유기탄소에 대한 흡착 속도, 생물농축계수 순으로 나타났다. 광양만 및 도료만의 입자성유기물질중 PFOA의 경우는

Table 3. Sensitivity analysis of chemicals concentration in particulate organic matter by change of values of parameters

Item		The changes of chemicals in POM (%)					
		Dixons Case 1	PFOA Case 2	PFOA Case 3	PFOS Case 4	PAHs Case 5	PAHs Case 6
Bioconcentration factor of phytoplankton	x1/2	0.403	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	x2	-0.775	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001
Uptake rate of phytoplankton	x1/2	0.001	0.000	0.000	-	0.000	-
	x2	-0.001	0.000	0.000	-	0.000	-
Excretion rate of phytoplankton	x1/2	-	-	-	0.000	-	-0.001
	x2	-	-	-	0.000	-	0.000
Adsorption rate of POC	x1/2	5.511	-7.290	-5.560	-43.700	1.370	-24.492
	x2	-2.994	3.740	3.160	66.190	-0.680	23.738
Partition coefficient of POC	x1/2	-42.332	-47.900	-48.200	-	-47.910	-
	x2	60.839	83.720	87.380	-	84.870	-
Desorption rate of POC	x1/2	-	-	-	15.710	-	24.223
	x2	-	-	-	-9.470	-	-28.075
Sinking velocity of particulate matter	x1/2	12.016	4.310	2.380	9.550	4.290	42.316
	x2	-16.967	-8.390	-4.120	-13.150	-7.780	-37.376
Photolysis coefficient	x1/2	-	-	-	-	6.160	8.638
	x2	-	-	-	-	-10.480	-12.882
Extinction coefficient	x1/2	-	-	-	-	-8.930	-
	x2	-	-	-	-	6.000	-

PFOA, Perfluorooctanoic acid; PFOS, Perfluorooctanesulfonic acid; PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; POC, Particulate organic carbon.

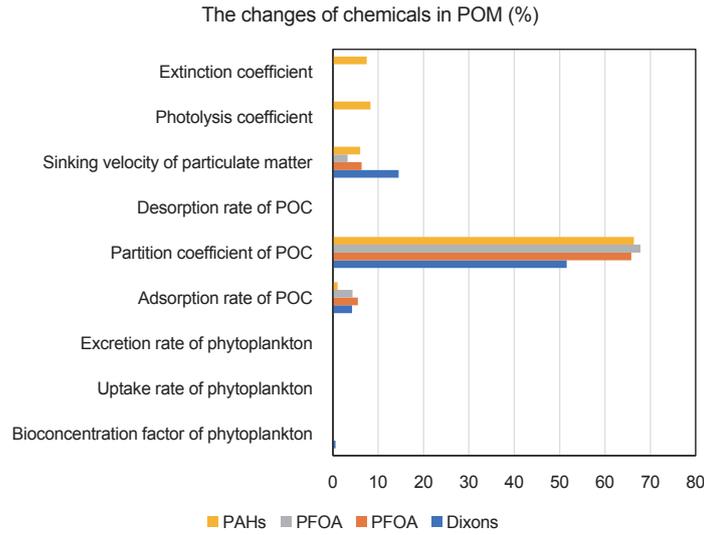


Fig. 2. Sensitivity analysis of chemicals concentration in particulate organic matter by 3-D fine grid ecosystem model. POM, Particulate organic matter; PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; PFOA, Perfluorooctanoic acid; POC, Particulate organic carbon.

분배계수, 흡착속도, 퇴적속도의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 특히 분배계수를 1/2배 시킨 경우 약 48.200% 감소하였으며, 2 배 시킨 경우 약 87.380% 증가하였다. 진해만 입자성유기물질 중 PAHs의 경우는 입자성 유기탄소에 대한 분배계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 영향이 큰 계수로 나타났으며, 다음으로 광분해속도, 소산계수, 입자성 물질의 침강속도, 입자성 유기탄소의 흡착속도의 순으로 나타났다.

멀티 박스 모델이 적용된 경우 광양만 입자성유기물질중 PFOS의 경우 입자성 유기탄소에 대한 흡착계수, 탈착계수, 침강속도의 순서로 영향이 큰 것으로 나타났다. 입자성 유기탄소에 대한 흡착계수를 증감시킨 경우에 변화량이 66.190% 및 -43.700%로 나타났다. 마산만 입자성유기물질중 PAHs의 경우 침강속도, 흡착 및 탈착속도, 광분해속도 순으로 영향이 큰 것으로 나타났다.

3차원 모델을 적용한 경우 모든 사례에서 입자성 유기탄소에 대한 분배계수에 대한 영향이 가장 큰 것으로 나타나, 멀티박스 모델의 경우도 분배계수에 대한 영향 평가를 실행해야 할 것으로 판단된다. 입자성유기물질중 유해물질의 경우 침강속도의 영향도 나타났으며, 입자성유기물질중PAHs의 경우 광분해 계수와 소산계수도 중요한 인자인 것으로 나타났다.

식물플랑크톤 체내 화학물질의 민감도 분석

식물플랑크톤 체내 화학물질에 대한 민감도 분석결과를 Table 4에 나타내었으며, 3차원 생태계 모델 적용시의 분석결과를 Fig. 3에 나타내었다.

3차원 모델이 적용된 울산만의 경우 식물플랑크톤 체내의 dioxins의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 -49.711% 및 98.187%로 가장 큰 것으로 나타났

며, 입자성 유기탄소에 대한 분배계수, 침강속도의 순으로 나타났다. 광양만 및 도교만의 식물플랑크톤 체내의 PFOA의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났으며 다음으로 섭취속도, 분배계수의 영향이 큰 것으로 나타났다. 특히 생물농축계수를 2배 증가시킨 경우는 예측농도가 약 90%이상 증가하였다. 진해만 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우는 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났으며, 다음으로 광분해속도, 소산계수 순으로 나타났다.

멀티 박스 모델이 적용된 경우 광양만 식물플랑크톤 체내의 PFOS의 경우 식물플랑크톤의 생물농축계수의 증감에 따른 농도변화가 가장 큰 것으로 나타났으며, 그 다음으로 식물플랑크톤의 분비속도가 영향이 큰 것으로 나타났다. 흡착 및 탈착속도, 침강속도에도 영향을 받은 것으로 나타났다. 마산만 식물플랑크톤 체내의 PAHs의 경우 식물플랑크톤의 생물농축계수와 분비속도가 가장 영향이 큰 것으로 나타났으며, 침강속도, 흡착 및 탈착속도, 광분해속도에도 영향을 받는 것으로 나타났다.

적용모델에 관계없이 식물플랑크톤의 농축계수가 가장 중요한 영향인자로 나타났으며, 식물플랑크톤의 분비속도에 대한 확인도 필요한 것으로 나타났다. 입자성 유기탄소 관련 인자의 경우 3차원 모델을 적용의 경우는 화학물질에 따라 영향의 유무가 달라졌으며, 광분해 계수와 소산계수도 중요한 인자인 것으로 나타났다.

고 찰

용존 화학물질의 경우 이류 및 확산의 영향이 상대적으로 큰 것으로 판단되며, 수층 유기입자와 관련된 인자들의 영향 유무

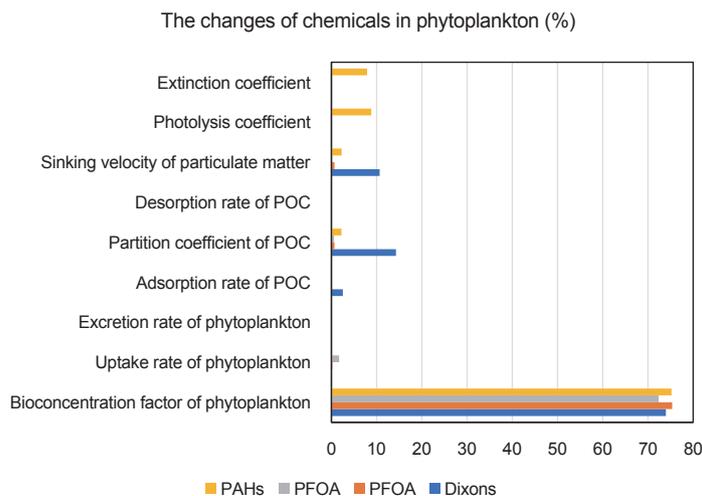


Fig. 3. Sensitivity analysis of chemicals concentration in phytoplankton by 3-D fine grid ecosystem model. PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; PFOA, Perfluorooctanoic acid; POC, Particulate organic carbon.

Table 4. Sensitivity analysis of chemicals concentration in phytoplankton by change of values of parameters

Item		The changes of chemicals in phytoplankton (%)					
		Dixons	PFOA	PFOA	PFOS	PAHs	PAHs
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Bioconcentration factor of phytoplankton	x1/2	-49.771	-50.070	-49.430	-49.990	-50.040	50.667
	x2	98.187	100.680	95.330	99.930	100.390	98.667
Uptake rate of phytoplankton	x1/2	0.005	0.340	-2.340	-	0.190	-
	x2	-0.002	-0.130	1.150	-	-0.090	-
Excretion rate of phytoplankton	x1/2	-	-	-	56.430	-	98.667
	x2	-	-	-	-27.830	-	-50.667
Adsorption rate of POC	x1/2	-3.063	-0.010	0.030	13.010	-0.010	34.667
	x2	2.075	0.020	-0.020	-17.390	0.000	-34.667
Partition coefficient of POC	x1/2	12.467	0.460	0.410	-	1.640	-
	x2	-16.149	-0.920	-0.760	-	-2.880	-
Desorption rate of POC	x1/2	-	-	-	-16.960	-	-36.000
	x2	-	-	-	19.740	-	38.667
Sinking velocity of particulate matter	x1/2	8.824	0.460	0.100	6.470	1.680	38.667
	x2	-12.555	-0.930	-0.200	-8.530	-2.940	-34.667
Photolysis coefficient	x1/2	-	-	-	-	6.540	10.667
	x2	-	-	-	-	-11.120	-17.333
Extinction coefficient	x1/2	-	-	-	-	-9.480	-
	x2	-	-	-	-	6.360	-

PFOA, Perfluorooctanoic acid; PFOS, Perfluorooctanesulfonic acid; PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons; POC, Particulate organic carbon.

는 화학물질별로 상이하게 나타났다. 입자성유기물질중 화학물질의 경우 입자성 유기탄소에 대한 분배계수, 흡착속도, 침강속도 순으로 중요한 영향인자이며, 이후 연구에서는 탈착계수

에 대한 민감도 분석도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 식물플랑크톤 체내 화학물질의 경우 식물플랑크톤의 농축계수가 가장 중요한 영향인자이며, 후속 연구시 식물플랑크톤의 분비속

도에 대한 민감도 분석도 반드시 수행되어야 할 것으로 판단된다. PAHs의 경우는 존재 형태에 관계없이 광분해 계수와 소산계수도 중요 영향인자인 것으로 나타났다. 3차원 미세격자모델에 비하여 대상해역을 동일한 하나의 반응기로 해석하는 박스모델의 경우가 입자와 관련된 계수의 영향이 크게 산정되는 경향을 나타내었다.

사 사

이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

- Eisler R. 1987. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons hazards to fish, wildlife, and invertebrates: A synoptic review. Biological Report 85, U.S. Fish and Wildlife Service, Laurel, MD, U.S.A., 1-81.
- Fiedler H. 1996. Sources of PCDD/PCDF and impact on the environment. *Chemosphere* 32, 55-64. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00228-6](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00228-6).
- Heo MJ, Roh KJ and Kim DM. 2020. Mass balance of perfluorooctane sulfonates in a semi-enclosed Bay, Korea. *J Environ Sci Int* 29, 969-979. <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.10.969>.
- Kim DM. 2007. Numerical simulation of PFOA in Tokyo Bay using EMT-3D. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 13, 173-181.
- Kim DM. 2011a. Numerical simulation for the prediction of PAHs in Jinhae Bay using EMT-3D model. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 17, 7-13. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.1.007>.
- Kim DM. 2011b. Scenario analysis of dioxins behaviors in Ulsan Bay of Korea using EMT-3D model. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 17, 89-96. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2011.17.2.089>.
- Kim DM. 2016. Numerical simulation of ammonium perfluorooctane (PFOA) in Gwangyang Bay. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 665-670. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0665>.
- Kim DM, Heo MJ, Oh SJ, Choi CG, You YS, Cho HS, Kang IJ and Oshima Y. 2011. Prediction of the transport and fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Masan Bay, South Korea. *J Fac Agr Kyushu Univ* 56, 299-305. <https://doi.org/10.5109/20324>.
- Kim DM, Nakada N, Horiguchi T, Takada H, Shiraishi H and Nakasugi O. 2004. Numerical simulation of organic chemicals in a marine environment using a coupled 3D hydrodynamic and ecotoxicological model. *Mar Pollut Bull* 48, 671-678. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.10.010>.
- Lipiatou E, Tolosa I, Simo R, Bouloubassi I, Dachs J, Marti S, Sicre MA, Bayona JM, Grimalt JO, Saliott A and Albaiges J. 1997. Mass budget and dynamics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Mediterranean Sea. *Deep Sea Res II Top Stud Oceanogr* 44, 881-905. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(96\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(96)00093-8).
- Mocarelli P, Needham LL, Marocchi A, Patterson Jr DG, Brambilla P, Gerthoux PM, Meazza L and Carreri V. 1991. Serum concentrations of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin and test results from selected residents of Seveso, Italy. *J Toxicol Environ Health* 32, 357-366. <https://doi.org/10.1080/15287399109531490>.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) 2002. Hazard Assessment of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Its Salts. Retrieved from <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPPT-2002-0043-0023> on Nov 21, 2024.
- Tolosa I, Bayona JM and Albaiges J. 1996. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfur/oxygen derivatives in northwestern mediterranean sediment: Spatial and temporal variability, fluxes and budgets. *Environ Sci Technol* 30, 2495-2503. <https://doi.org/10.1021/es950647x>.
- US EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2003. Preliminary risk assessment of the developmental toxicity associated with exposure to perfluorooctanoic acid and its salt. U.S. EPA, Washington D.C, U.S.A., 1-61.