



Original Article

## 해양생태계 내 잔류성오염물질 조사 현황 및 발전 방향

원중호<sup>1</sup> · 이용우<sup>2,†</sup> · 김성진<sup>3</sup> · 김성길<sup>4</sup>

<sup>1</sup>해양환경공단 해양수질팀 대리

<sup>2</sup>해양환경공단 해양수질팀 차장

<sup>3</sup>해양환경공단 해양수질팀 사원

<sup>4</sup>해양환경공단 해양수질팀 팀장

## Status and Developmental Direction of Persistent Pollutants Survey on Marine Ecosystems of Korea

Jong-Ho Won<sup>1</sup>, Yong-Woo Lee<sup>2,†</sup>, Seong-Jin Kim<sup>3</sup>, and Seong-Gil Kim<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

<sup>3</sup>Researcher, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

<sup>4</sup>Team Leader, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 49111, Korea

### 요 약

잔류성오염물질로부터 인간의 건강과 환경 보호를 목적으로 잔류성유기오염물질(POPs)에 관한 스톡홀름 협약과 수은에 관한 미나마타 협약이 발효되었다. 해양수산부에서는 해양생태계 내 POPs의 오염실태 조사를 2001년부터 수행해 왔으며, 2008년에 해양환경관리법 내 POPs 조사 관련 법을 제정하였다. 해양생태계 내 POPs 조사 결과, 배출 및 사용 규제를 통해 적극적으로 관리되고 있는 기존 POPs 중 다이옥신류 농도는 연차별로 감소하는 경향을 보인 반면 신규 POPs(PBDEs, HBCDs, PFASs) 농도는 기존 POPs에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 신규 POPs가 지속적으로 등재되고 있어 신규 POPs로부터 환경을 보호하기 위해서 신속하고 적절한 대응이 필요하며, 장기 조사 결과들을 반영한 잔류성오염물질 조사체계의 개편이 필요할 것으로 판단된다. 또한 해양생태계의 건강성 유지를 위한 잔류성오염물질 기준 및 관리 방안 마련이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 해양생태계 내 잔류성오염물질 조사 현황을 분석하고 잔류성오염물질의 효율적 관리를 위한 정책적 제언을 제시하고자 한다.

**Abstract** – The Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) and Minamata Convention on mercury and mercury compounds took effect. The aim of these conventions is to protect human health and the environment from persistent pollutants. The Ministry of Oceans and Fisheries has conducted surveys on the status and progress of contamination of POPs in marine ecosystems since 2001, and in 2008, the law on the surveys of POPs in the Marine Environment Act was enacted. In marine ecosystems, the concentration of dioxins, where regulations on emissions and use are actively managed, showed a gradual decreasing trend in each year. While the concentrations of new POPs such as PBDEs, HBCDs, and PFASs were found to be relatively higher than those of legacy POPs. Because new POPs have been listed regularly, prompt and appropriate responses are required to prevent the environment from new POPs. It is necessary to reorganize the investigation system for persistent pollutants in marine ecosystems based on the long-term survey results. It is necessary to establish persistent pollutants criteria and preparation of management measures for maintaining the marine ecosystem health. In this study, we analyze the status of surveys on persistent pollutants in marine ecosystems and suggest policy proposals to efficiently manage these pollutants.

**Keywords:** Persistent Organic Pollutants(잔류성유기오염물질), Mercury(수은), Stockholm Convention(스톡홀름 협약), Minamata Convention(미나마타 협약)

<sup>†</sup>Corresponding author: wbluese@koem.or.kr

## 1. 연구 배경

잔류성유기오염물질(POPs: Persistent Organic Pollutants)은 잔류성, 장거리 이동성, 생물 농축성, 강독성 등으로 인하여 1970년대부터 선진국을 중심으로 사용이 금지되거나 제한되고 있지만, 유기염소계 농약 중 DDTs의 경우 아프리카 국가들 중 일부에서 말라리아를 예방하기 위한 목적으로 현재도 사용하고 있으며(Bouwman *et al.*[2019]; UNEP[2019a]), 장거리 이동성으로 인하여 POPs를 사용하고 있지 않은 국가 및 극지방 등에서도 발견되고 있다(Luek *et al.*[2017]; Pozo *et al.*[2009]; Wania and Mackay[1996]).

POPs의 강한 독성으로 인하여 생태계 내의 생물체 뿐만 아니라 인간의 건강도 위협하고 있어(Jacob and Cherian[2013]; Sweetman *et al.*[2005]) 유엔환경계획(UNEP: United Nations Environment Program)을 중심으로 POPs의 규제 필요성이 제기되고 정부간 협상을 거쳐 2001년 5월에 POPs에 관한 스톡홀름 협약이 채택되었다(UNEP[2019b]). 스톡홀름 협약은 다이옥신, PCBs, DDTs 등 12가지 유해물질의 사용, 생산 및 배출을 저감 또는 근절하기 위해 체결된 국제협약으로 2004년 5월에 발효되었으며, 2018년까지 182개국이 가입하고 152개국이 서명하였다. 한국은 2001년 10월 협약에 가입하고 2007년 1월에 협약에 비준하였다. 스톡홀름 협약 발효 이후 협약 이행의 실효성을 평가하기 위해 국가 또는 지역단위의 모니터링을 실시하여 측정 자료에 대한 지역적, 전 지구적 차원의 공유를 요구하고 있다.

대표적인 중금속 유해물질인 수은에 관한 미나마타 협약은 2013년 1월 유엔환경계획(UNEP) 제5차 정부 간 협상에서 140여 국가가 뜻을 모았으며, 2013년 10월 일본 미나마타에서 공식적으로 조약을 체결하였다. 미나마타 협약은 2017년 8월에 발효되었으며, 2019년 현재 128개국이 서명하고, 107개국이 비준하였다. 한국은 2014년 9월 협약에 서명하고 현재 비준을 위한 절차를 밟고 있다. 미나마타 협약이 발효됨에 따라 2020년부터 수은 함량이 많은 특정 제품의 생산과 수출입을 막아 전체 배출량을 줄여 나가게 된다.

여러 경로를 통해서 해양환경 중에 유입된 수은은 해양생태계 내 먹이사슬을 통해 해양생물은 물론 인간에게 까지 전이되며, 체내로 유입된 수은은 체외로 잘 배출되지 않고 축적되어 장기나 신경계에 지속적으로 독성 영향과 손상을 미치는 특성을 가지고 있다. 특히 메틸수은은 친지성(lipophilic)이 높아 혈액뇌장벽과 태반장벽을 쉽게 통과하고 어패류와 같은 수산물 등 음식물의 섭취를 통해 높은 흡수 효율을 보이는 것으로 알려져 있으며, 친수성(hydrophilic)이 상대적으로 강한 무기수은에 비해 같은 농도 수준에서 약 100배의 높은 독성을 보인다(Mahaffey *et al.*[2011]; Nielsen[1992]). 수계로 유입된 수은은 퇴적물 중의 황 환원성 박테리아에 의해 메틸수은으로 변환된다(Mason and Lawrence[1999]; Mason *et al.*[1999]). 퇴적물 내 총수은 중 메틸수은 농도는 약 1~3%를 차지하나 저서성 어패류의 경우 총수은 농도의 약 80~90%가 메틸수은 형태로 존재하는 것으로 알려져 있다(Henny *et al.*[2002]; Mergler *et al.*[2007]).

각 국가별로 다양한 제도들을 통해서 POPs를 포함한 화학물질의 생산, 수출입 등을 관리·규제하고 있다(<https://chemicalwatch.com>). EU는 화학물질의 양과 위해성에 따라 등록, 평가, 허가, 제한하는 신 화학물질관리제도(REACH: Registration, Evaluation, Authorisation & Restriction of Chemicals)를 2007년부터 시행하고 있다. 중국은 신 규화학물질환경관리제도, 일본은 화학물질의 심사 및 제조 등의 규제에 관한 법률, 캐나다의 신규화학물질 신고 규정 등을 통하여 화학물질 관리 및 규제를 하고 있다. UN에서는 화학제품의 위험·유해성에 관한 분류 및 표시의 세계 통일화를 위해 GHS(화학물질에 대한 분류 표시 국제조화 시스템)를 채택하였다. 미국에서는 새로운 화학물질 관리제도인 화학물질 평가 및 관리 프로그램(ChAMP: Chemical Assessment and Management Program)을 운영하고 있다.

국내에서는 농약관리법, 화학물질관리법, 폐기물관리법, 잔류성유기오염물질 관리법에서 POPs에 관한 관리와 규제를 하고 있다. 농약관리법에서는 1969년부터 알드린(Aldrin), 클로르데인(Chlordane), 디엘드린(Dieldrin), 엔드린(Endrin), 헵타클로르(Heptachlor), 디디티(DDT)를 대상으로 규제를 시작하여 현재 10여종의 POPs에 대해서 관리를 하고 있다(KEI[2000]). 환경부에서는 스톡홀름 협약의 시행을 위하여 협약에서 규정하는 POPs의 관리에 필요한 사항을 규정함으로써 POPs의 위해로부터 국민의 건강과 환경을 보호하고 국제협력 증진을 목적으로 2007년에 잔류성유기오염물질 관리법을 제정하였다. 스톡홀름 협약의 이행을 위해 2009년 4월 국가이행계획서를 작성하여 당사국 총회에 제출하였다(Kim and Lee[2010]).

해양수산부에서는 해양생태계 내 POPs 관리를 위하여 2008년에 관련 법을 개정하였으며(해양환경관리법 제39조, 시행규칙 제24조), 해수, 해저퇴적물 및 해양생물 내 POPs의 오염실태 및 진행상황 등을 파악하기 위해서 주기적으로 조사를 실시하고 있다. 수은에 관한 미나마타 협약에 따른 의무 이행을 위해 2019년부터 유기수은에 관한 조사를 추가적으로 실시하고 있다.

현재의 해양생태계 내 잔류성오염물질에 대한 조사 체계는 잔류성오염물질의 오염실태 및 장기변동 양상을 파악하는 수준이며, 조사 자료를 활용한 종합적인 잔류성오염물질 관리 방안 및 대책 수립은 아직 미흡한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 해양생태계 내 잔류성오염물질의 조사 현황 및 현 조사 체계의 문제점 등을 파악하여 잔류성오염물질에 대한 관리 및 대응 방안 등에 대해서 제시하고자 한다.

## 2. POPs 등재 현황

스톡홀름 협약에 따라 2001년에 다이옥신, PCBs를 포함한 12종이 POPs로 지정되었으며, 2009년에 9종이 신규로 등재되었다, 이후 2년마다 1~3종의 새로운 유해물질이 POPs로 등재되어 2018년까지 총 28종이 POPs로 지정되어있다(Table 1). 새로운 POPs 추가는 POPs 검토위원회(POPs Review Committee, POPRC)의 평가를 통해서 이루어진다. 추가 규제대상으로 제안된 화학물질이 협약에서 설정한 요건(잔류성, 농축성, 장거리 이동성, 강독성 등)을 만

축하는지 여부를 확인한 후 각국 정부 및 민간단체 등 이해관계자들이 제공하는 자료들을 근거로 국제적 규제가 필요한 지 여부를 결정하게 된다(UNEP[2019c]).

POPs는 스톡홀름 협약 부속서 A, B, C로 구분하여 등재되어 있으며, 부속서 A는 생산 및 수출입, 사용 금지물질, 부속서 B에 등재되어 있는 물질은 허용 용도 또는 특정한 용도로만 생산, 사용이 허용된 제한물질, 부속서 C는 비의도적 발생 물질로 구분된다(Table 1).

POPs는 유기염소계 농약, 산업용 화학물질, 산업공정의 부산물로 구분되고, 총 28종 POPs 중 PeCB(Pentachlorobenzene), HCB(Hexachlorobenzene)는 위의 세 그룹에 모두 포함되며, 유기염소계 농약은 알드린(Aldrin), 클로르데인(Chlordane, CHLs), DDT(Dichlorodiphenyl-trichloroethane), 디엘드린(Dieldrin), 엔드린(Endrin), 헵타클로르(Heptachlor), 미렉스(Mirex), 독사펜(Toxaphene), Alpha-, Beta-HCH (Alpha-, Beta-hexachlorocyclohexane), Gamma-HCH (Lindane), 클로르데콘(Chlordecone), PCP(Pentachlorophenol and its salts and esters) 그리고 엔도설파넷 그 이성체(Technical endosulfan and its related isomers)를 포함한다. 산업용 화학물질은 PCBs(Polychlorinated Biphenyls), HBB(Hexabromobiphenyl), HBCDs(Hexachlorocyclododecane), PBDEs(commercial octabromodiphenyl ether, commercial pentabromodiphenyl ether, c-deca BDE), PFOS(Perfluorooctane sulfonic acid), PFOSF(Perfluorooctane sulfonyl fluoride) 그리고 SCCPs(Short-chain chlorinated paraffins)이며, 비의도적인 생성물로서 다이옥신(Dioxins)과 퓨란(Furans)이 포함된다. HCBD(Hexachlorobutadiene), PCNs(Polychlorinated naphthalenes)는 산업용 화학물질이면서 비의도적인 생성물로 분류된다. 유기염소계 농약은 주로 살충제로 사용되어 왔으며, 이들 물질은 환경 내에서 분해가 잘되지 않아 잔류성이 강하여, DDT의 경우 토양에서의 반감기가 약 10~15년인 것으로 알려져 있다. 이들의 위해성으로 인해 유기염소계 농약류는 1970년대부터 선진국을 중심으로 사용이 금지되어 왔으며, 국내에서도 1970년대부터 전면 사용 금지되었다. 다이옥신, 퓨란 그리고 HCB 등은 폐기물 소각을 포함한 각종 산업공정에서 발생하는 부산물로(El-Shahawi *et al.*[2010]), UNEP는 이들 부산물을 “인위적인 모든 활동(anthropogenic sources)에서 비의도적으로 발생 또는 배출되는 물질”로 정의하였다.

### 3. 국내 잔류성오염물질 조사 현황

환경부에서는 스톡홀름 협약의 이행 및 국내 POPs의 체계적인 관리를 위해 ‘잔류성유기오염물질 관리법’ 제정(2007년 1월) 및 시행(2008년 1월) 하고 있다. POPs의 저감 및 근절을 위해 POPs 제조, 수출입, 사용금지 또는 제한, POPs 배출규제, POPs 함유폐기물의 처리, POPs 함유기기의 관리기준 등을 마련하였다. 환경오염 관리를 위해 배출허용기준 준수 의무(제14조 제3항) 관련 법을 근거로 배출시설별 배기가스와 폐수로 배출되는 POPs의 배출허용기준을 적용하고 배출농도가 배출허용기준을 초과할 시 개선명령 조치, 개선명령을 이행하지 않을 시 사용중지 명령, 배출허용기준 준수가 불가능한 경우 폐쇄명령을 할 수 있도록 법으로 규정되어 있다.

환경부에서는 POPs 관리에 관한 기본목표와 추진방향, 주요 추진계획, 국제기구 및 국내·외 기관과의 협력계획 등을 포함한 POPs 관리 기본계획을 수립하고 있으며, 전국 대기, 수질, 토양, 퇴적물에 대한 POPs의 오염실태 및 오염추세를 종합적으로 파악하기 위해서 POPs 측정망 설치·운영계획을 고시하고 POPs 측정망을 운영하고 있다. 환경부의 POPs 측정망은 대기의 경우 연 2회, 수질, 토양, 퇴적물에 대해서는 각각 연 1회 조사를 기본으로 하고 있다(잔류성유기오염물질 측정망 설치·운영계획, 2017). 또한 2013년 수에 관한 미나마타 협약이 채택됨에 따라 ‘잔류성유기오염물질 관리법’에서 ‘잔류성오염물질 관리법’으로 개정하였으며(2016년 1월), 미나마타 협약 발효 전에 수온관리 종합대책(2016~2020년)을 수립하였다.

해양수산부에서는 2008년에 ‘해양환경관리법(제39조)’ 내 잔류성유기오염물질 조사 관련 법을 제정하였으며, 2017년 수온에 관한 미나마타 협약이 발효됨에 따라 2017년에 관련 법 조문명을 잔류성오염물질로 변경하였다. 해양생태계 내 잔류성오염물질 조사는 2001~2010년까지 국립수산과학원에서 수행하였고, 2011년부터는 해양환경공단으로 본 사업이 이관되어 ‘해양환경측정망 운영’ 사업 내에서 조사를 계속 수행하였다. 2013년부터는 본 사업이 ‘해양환경측정망 운영’ 사업에서 분리되어 ‘해양생태계 내 잔류성유기오염물질 조사사업’으로 확대·개편되었다. 조사 정점은 기존(2003~2012년)에 전국연안 25개 정점에서 2013년부터는 50개 정점으로 확대하

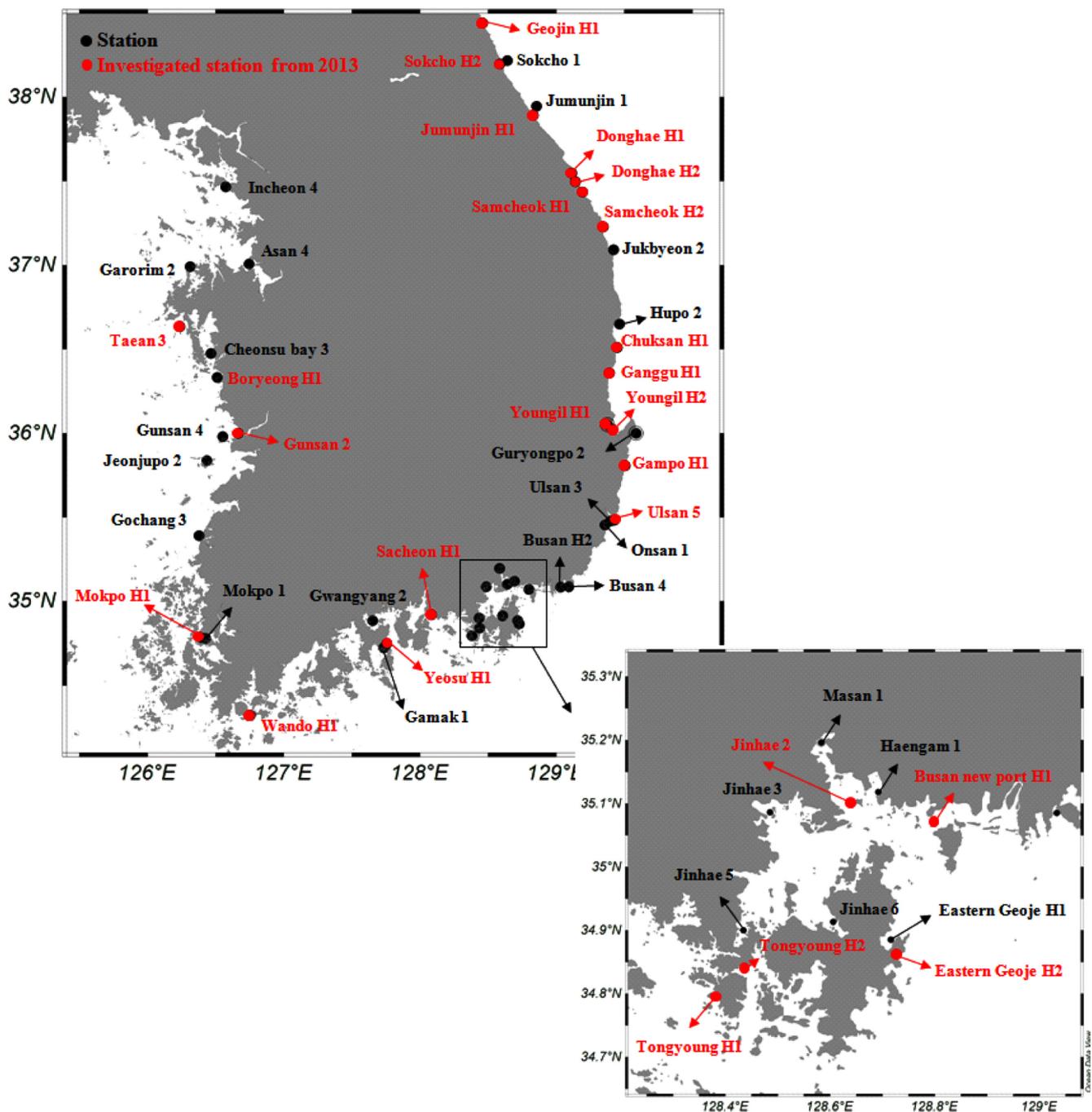
**Table 1.** The list of the chemicals targeted by the Stockholm Convention

Year	Chemical name
The 12 initial POPs in 2001	Aldrin <sup>(a)</sup> , Chlordane <sup>(a)</sup> , DDT <sup>(b)</sup> , Dieldrin <sup>(a)</sup> , Endrin <sup>(a)</sup> , Heptachlor <sup>(a)</sup> , Hexachlorobenzene (HCB) <sup>(a, c)</sup> , Mirex <sup>(a)</sup> , Toxaphene <sup>(a)</sup> , Polychlorinated biphenyls (PCBs) <sup>(a, c)</sup> , Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) <sup>(c)</sup>
The 9 New POPs in 2009	$\alpha$ -HCH <sup>(a)</sup> , $\beta$ -HCH <sup>(a)</sup> , $\gamma$ -HCH (Lindane) <sup>(a)</sup> , Chlordecone <sup>(a)</sup> , Pentachlorobenzene (PeCB) <sup>(a, c)</sup> , Penta-BDE <sup>(a)</sup> , Octa-BDE <sup>(a)</sup> , PFOS <sup>(b)</sup> , Hexabromobiphenyl <sup>(a)</sup>
The 1 New POPs in 2011	Endosulfan <sup>(a)</sup>
The 1 New POPs in 2013	Hexabromocyclododecane (HBCD) <sup>(a)</sup>
The 3 New POPs in 2015	Chlorinated naphthalenes <sup>(a, c)</sup> , Hexachlorobutadiene <sup>(a, c)</sup> , Pentachlorophenol and its salts and esters <sup>(a)</sup>
The 2 New POPs in 2017	Short-chained chlorinated paraffins <sup>(a)</sup> , Decabromodiphenylether (commercial mixture, c-decaBDE) <sup>(a)</sup>
Chemicals proposed for listing under the Convention (3)	Dicofol, PFOA, its salts and PFOA-related compounds, PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds

<sup>(a)</sup>Annex A: eliminate, <sup>(b)</sup>Annex B: restrict, <sup>(c)</sup>Annex C: unintentional release

**Table 2.** Comparison of persistent organic pollutants (POPs) monitoring in environment of Korea

Division	POPs monitoring in marine ecosystems	POPs monitoring in the fishing ground environment	POPs monitoring in land ecosystems
Legal basis	Marine environment management Act	Fishing ground management Act	Persistent organic pollutants control Act
Investigation media	Seawater, marine sediment, marine organism	Seawater, marine sediment, marine organism	Atmosphere, water, soil, sediment
Investigation period	1 time/year (February)	1 time/year (February)	1~2 times/year (Spring/Autumn)
Investigation stations	50/seawater, 50/marine sediment, 50/marine organism	50/marine sediment, 30/marine organism	30/atmosphere, 36/water, 61/soil, 36/sediment



**Fig. 1.** The station map of persistent organic pollutants (POPs) monitoring in the coastal region of Korea. The red color circles represent the stations investigated since 2013.

여 연 1회(2월) 조사를 실시하고 있다(MOF[2016])(Table 2, Fig. 1). 조사항목은 해수의 경우 친수성이 강한 과불화화합물(PFASs)에 대해서만 조사를 실시하고, 해양생물과 해저퇴적물에 대해서는 각각 다이옥신/퓨란류를 비롯한 17개 항목에 대해서 조사를 실시하고 있다(MOF[2016]). 2013년부터 2017년까지는 매년 특별관리해역(부산연안, 마산만, 울산연안, 광양만, 시화-인천연안)에 대해서 순차적으로 정밀조사를 실시하였다.

해양수산부 소속기관인 국립수산물품질관리원에서는 ‘어장관리법’ 제 6조를 근거로 어장의 효율적인 이용·보전과 어장환경 상태 및 오염원의 측정·조사 등을 위하여 ‘어장환경모니터링 사업’을 수행하고 있다. 어장환경모니터링은 전국 308개 정점에서 연 6회 해양환경 조사를 실시하고 있으며, 잔류성유기오염물질은 30개 해역의 해저퇴적물 50개, 해양생물 30개 정점에서 연 1회(2월) 조사를 수행하고 있다(NIFS[2017]).

해수 중 총수은에 대한 조사는 환경처에서 1980년부터 시작하였으며, 해저퇴적물과 해양생물(이매패류)에 대해서는 1999년부터 조사를 수행하고 있다. 현재 해양수산부는 해양생태계 내 총수은 조사를 ‘해양환경측정망 운영 사업’을 통해 실시하고 있으며, 2019년 현재 해수와 해저퇴적물에 대해서는 198개 정점, 해양생물에 대해서는 50개 정점에서 조사를 진행 중이다. 수은의 경우 무기수은보다 유기수은의 독성이 더 강하므로 이들 물질에 대한 조사의 필요성이 대두됨에 따라 해저퇴적물과 해양생물 중 유기수은 신속 분석법을 개발하고(KOEM, 2016), 해저퇴적물과 해양생물 중 유기수은에 대한 조사를 2019년부터 전국 연안 50개 정점에서 수행 중이다.

환경부에서는 미나마타 협약 발효 전 선제적인 대응을 위하여 2013년부터 2015년까지 수은 통합 모니터링 체계 구축을 위한 연구사업을 수행하였으며, 2016년부터 2020년 까지 ‘국가 수은 통합 측정망 시범사업’을 진행 중에 있다. 이들 사업의 연구결과들을 토대로 2021년부터 국가 수은 측정망을 운영할 계획이다.

2014년에 전국연안 기준/신규 POPs 실태 조사 결과에 따르면, 대표적으로 해저퇴적물 내 PCBs 농도는 불검출~19.3 ng/g dry weight 범위로 모든 정점에서 NOAA(미국 국립해양대기청)에서 제시하고 있는 ERL(Effect Range Low, 서식생물 중 10%에 영향, 22.7 ng/g dry weight) 기준 이하로 나타났으며, DDTs 농도는 불검출~12.2 ng/g dry weight로 일부해역(특별관리해역 및 항만)에서 ERL 기준(1.58 ng/g dry weight)을 초과하는 것으로 나타났다(MOF[2016]). 배출 및 사용에 대한 규제를 통해 적극적으로 관리되고 있는 다이옥신/퓨란류 농도는 연차별로 점차 감소하는 경향을 보였다(MOF[2016]). 울산/온산만을 대상으로 조사한 결과에서는 전반적으로 모든 매체에서 신규 POPs(PBDEs, HBCDs, PFASs) 농도가 기존 POPs에 비해 상대적으로 높게 나타났다(MOF[2016]). 2001년과 2009년에 POPs로 등재된 다이옥신류와 PBDEs의 농도는 울산/온산만에서 10년전에 조사된 결과와 비교했을 때 뚜렷하게 감소한 경향을 보였다. 전반적으로 기존 POPs 농도는 저감 및 규제 정책에 의해 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있는 반면 신규로

지정된 POPs에 의한 오염은 곳곳에서 발견되고 있다(Meng *et al.*[2017]).

국내의 해양생태계 내에서 수은에 대한 조사는 주로 총수은 농도의 분포 특성 및 오염도에 대한 연구들이 주를 이루고 있으며(Joe *et al.*[2018]; Sun *et al.*[2015]), Joe *et al.*[2018]에 의하면 전국 연안 해저퇴적물 282개의 정점 중 국내 ‘해양환경기준(해양수산부 고시 제2018-10호)’ 총수은 주의기준 농도(0.11 mg/kg)를 초과하는 정점은 약 8%를 차지하였다. 반면 생물 농축 및 인체에 미치는 영향이 상대적으로 중요한 메틸수은에 대한 조사는 매우 미흡한 상황이다(Choi *et al.*[2017]; Kang *et al.*[2017]). Choi *et al.*[2017]은 국내 연안에서 서식하는 수산물 중 총수은과 메틸수은 농도를 측정하였으며, 개체군별 총수은 중 메틸수은이 차지하는 평균 비율은 약 57~83%인 것으로 보고하였다. 따라서 해저퇴적물과 해양생물 내에 존재하는 메틸수은에 대한 조사와 해양생태계 내로 유입된 수은이 메틸화되는 과정 등에 대한 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 국·내외 잔류성오염물질 환경기준

환경부에서는 환경오염방지를 위해 POPs 배출허용기준 등을 설정하여 관리하고 있으며, 주로 배기가스와 폐수를 통해 배출되는 다이옥신을 위주로 기준이 설정되어 있다. 국내 잔류성유기오염물질 배출허용기준은 ‘잔류성유기오염물질 관리법’ 시행규칙 별표 3에 수록되어 있으며(환경부령 제785호[시행 2018.12.13.]), 대상시설별 배출유형(배기가스 및 폐수)에 따라 다이옥신의 배출허용기준이 설정되어 있다. 또한 대상시설은 신설시설과 기존시설로 구분되어 있으며, 폐수로 배출되는 다이옥신 배출허용기준은 10~300 pg-TEQ/L로 마련되어 있다.

국내 해양에서 POPs의 해양환경관리를 위한 기준은 마련되어 있지 않은 상황이며, 해양환경기준(해양수산부 고시 제2018-10호) 내 사람의 건강보호 기준에 PCB만 0.0005 mg/L로 설정되어 있다. 또한 오염퇴적물 정화·복원을 위한 기준 내에 일부 항목(PCBs, Chlordane, Dieldrin, DDT)에 대해서 설정되어 있다(해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정(해양수산부고시 제2018-15호) 별표 1). 이들 기준치는 NOAA(미국 국립해양대기청)에서의 퇴적물 내 ERL(Effect Range Low, 서식생물 중 10%에 영향)과 ERM(Effect Range Medium, 서식생물 중 50%에 영향)의 기준과 유사한 수준이다. 미국, 캐나다, 오스트레일리아 등의 국가에서는 POPs와 관련된 기준이 설정되어 있으며(Table 3), 건강한 해양생태계를 유지 및 체계적인 관리를 위해서는 국내 실정을 맞는 POPs 기준 마련이 필요할 것으로 판단된다.

국내에서 수은 및 메틸수은 기준과 관련하여 식품공전에서는 국내 수산물(어류, 연체류 등) 중 총수은의 잔류허용기준은 0.5 mg/kg 이하(심해성 어류, 다랑어류, 새치류 등 제외)이고, 메틸수은의 잔류허용기준은 1.0 mg/kg 이하(심해성 어류, 다랑어류, 새치류 등에 한함)로 설정되어 있다(<https://www.foodsafetykorea.go.kr>). FAO/

**Table 3.** Marine sediment quality guidelines (SQG) values for organic pollutants

Chemicals	Unit	Canada <sup>a</sup>		Australia <sup>b</sup>		the United States (NOAA) <sup>c</sup>		Hong-Kong <sup>d</sup>		Consensus-based SQGs <sup>e</sup>	
		ISQG <sup>f</sup>	PEL <sup>g</sup>	ISQG-Low	ISQG-High	ERL <sup>h</sup>	ERM <sup>i</sup>	ISQV <sup>j</sup> -Low	ISQV <sup>j</sup> -High	TEC <sup>k</sup>	MEC <sup>l</sup>
PCDDs/DFs*	pg-TEQ/g dw	0.85	21.5	-	-	-	-	-	-	0.85	11.2
PCBs	ng/g dw	21.5	189	23	-	22.7	180	22.7	180	60	368
DDTs	ng/g dw	-	-	1.6	46	1.58	46.1	1.58	46.1	-	-
DDD	ng/g dw	1.22	7.81	-	-	-	-	-	-	-	-
DDE	ng/g dw	2.07	374	-	-	-	-	-	-	-	-
DDT	ng/g dw	1.19	4.77	-	-	-	-	-	-	4.2	33.6
CHLs	ng/g dw	2.26	4.79	-	-	-	-	-	-	-	-
Dieldrin	ng/g dw	0.71	4.3	0.02	8	0.02	8	-	-	1.9	32
Endrin	ng/g dw	2.67	62.4	0.02	8	0.02	8	-	-	2.2	104.6

<sup>a</sup>[https://www.ccm.ca/en/resources/canadian\\_environmental\\_quality\\_guidelines/](https://www.ccm.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/), <sup>b</sup>McCready *et al.*[2006], <sup>c</sup>Buchman[2008], <sup>d</sup>Burton Jr.[2002], <sup>e</sup>Doyle *et al.*[2003], <sup>f</sup>ISQG: Interim marine Sediment Quality Guidelines, <sup>g</sup>PEL: Probable Effect Levels, <sup>h</sup>ERL: Effect Range Low, <sup>i</sup>ERM: Effect Range Median, <sup>j</sup>ISQV: Interim Sediment Quality Value, <sup>k</sup>TEC: Threshold Effect Concentration, <sup>l</sup>MEC: Midpoint Effect Concentration; \*PCDDs/DFs: 2,3,7,8-TCDD

WHO의 국제식품규격위원회(Codex Alimentarius Commission, CODEX)는 메틸수은 가이드라인을 육식성 어류의 경우 1.0 mg/kg, 일반어류는 0.5 mg/kg으로 설정하고 있다. 미국은 어류 및 기타수산물 중 메틸수은 함유량을 1.0 mg/kg, 일본은 일반어류 중 메틸수은 함유량을 0.3 mg/kg, 중국은 일반어류와 기타 수산물의 메틸수은 함유량을 0.5 mg/kg, 육식성 어류에 대해서는 1.0 mg/kg으로 적용하고 있다(Kim *et al.*[2010]). ‘해양환경기준(해양수산부 고시 제 2018-10호)’에는 해수 중 총수은에 대해서 기준이 마련되어 있으며, 해저퇴적물 내에서는 총수은의 주의기준과 관리기준이 마련되어 있다.

### 5. 잔류성오염물질 조사 체계 개편 및 정책적 제언

해양수산부는 해양환경관리법 제39조 및 시행규칙 제24조를 근거로 해양에 존재하는 잔류성오염물질의 오염실태 및 진행상황 등에 대해 측정·조사를 실시하고 있다. 환경부는 ‘잔류성유기오염물질관리법’ 제11조를 근거로 전국 대기·수질·토양·퇴적물에 대한 POPs의 오염실태 및 오염추세를 종합적으로 파악하여 POPs 정책 수립을 위한 기초자료를 확보하고 있으며, 주기적으로 잔류성유기오염물질 측정망 설치·운영 계획을 고시하고 있다. 해양수산부에서도 현재 조사 체계의 문제점 등을 분석하여 조사정점, 조사시기, 조사항목, 조사방법 등을 재정립하고 해양생태계 내 잔류성오염물질 측정망 구성·운영 계획을 마련하여 고시할 필요가 있다. 현재 해양생태계 내 POPs 조사는 전국 연안 50개 정점에서 연 1회(2월) 동일한 조사항목에 대해서 조사를 실시하고 있으나 기존의 장기조사 결과들을 토대로 조사정점, 조사시기, 조사항목 등에 대한 재정립이 필요한 시점이다. 기존 POPs는 사용의 제한 및 규제로 인하여 해양생태계 내에서 농도가 감소하는 경향을 보이는 반면, 신규로 등재된 POPs의 경우는 상대적으로 높은 농도를 보이고 있다(MOF[2016]). 이러한 조사 결과들을 토대로 기존 POPs에 대한 조사는 시간에 따른 변화 양상을 관찰하는 수준에서 조사주기를 적

절히 조절할 필요가 있다. 또한 최근에는 주로 산업용으로 사용되고 있는 유해물질들이 신규 POPs로 등재되고 있어 대규모 산업단지 주변으로의 조사정점 확대가 필요할 것으로 판단된다. 해양생태계 내 잔류성오염물질 조사 체계 구축 및 조사정점, 주기, 방법 등을 효율적으로 선정·조절하고, 해양생태계 내 잔류성오염물질에 의한 오염을 적극적으로 관리하기 위해서는 전문위원회를 운영할 필요가 있을 것으로 판단된다.

전국 연안의 잔류성오염물질의 오염 실태 조사 결과를 토대로 우선관리대상해역 및 해역별 우선관리대상물질을 선정하여, 오염이 우려되는 해역에 대해서는 정밀조사를 통하여 오염원을 추적하고, 관리대상물질에 대해서는 오염을 저감하기 위한 정책적 노력이 필요할 것이다. 이러한 해양생태계 내 잔류성오염물질의 체계적인 관리를 위해서는 해양생태계 내 환경기준을 설정하는 것이 필요할 것이다. 해양환경관리법 시행규칙 제24조에는 잔류성오염물질의 연평균 오염도가 2년 이상 해양수산부장관이 정하여 고시하는 해양퇴적물 관리목표를 초과하는 경우 오염저감대책을 수립하거나 배출원 조사를 실시하고 필요한 조치를 취하는 것으로 되어 있다. 따라서 국내 연안에서 조사된 장기 분석 결과와 국외의 잔류성오염물질 기준 설정 사례 등을 분석하여 잔류성오염물질에 대한 해양환경기준 및 해역별 관리목표를 설정하여 해양생태계 내 잔류성오염물질의 저감을 위한 관리 방안 마련이 필요한 시점이다.

육상에서 발생한 잔류성오염물질은 최종적으로 해양으로 유입되는 것으로 알려져 있으나, 해양으로 유입되는 잔류성오염물질의 배출원 및 배출량에 대한 정확한 조사가 이루어지고 있지 않은 실정이다. 해양 방류수에 대해서도 주로 COD, TN, TP와 같은 화학물질에 대해서만 관리가 되고 있는 상황이다. 하수처리장 방류구를 중심으로 조사된 결과들에서 신규 POPs의 농도가 상대적으로 높은 것으로 보고되고 있어(Anderson and MacRae[2006]; Hong *et al.*[2010]; Samara *et al.*[2006]), 해양 방류수를 통한 POPs의 오염원 관리도 필요할 것으로 판단된다. OCPs, PCBs, PBDEs, HBCDs는 물에 잘 녹지 않는 물리·화학적 특성 때문에 주로 퇴적물에서 상대

적으로 높게 나타난다(Meng *et al.*[2017]). 반면 과불화화합물(PFASs)은 용해도가 커서 해수 중에서 상대적으로 높은 농도를 보인다(Meng *et al.*[2017]). 하수를 정화하는 과정에서 대부분의 POPs 농도는 감소하는 것으로 알려져 있는 반면 친수성이 상대적으로 강한 POPs는 하수처리과정 과정에서 대부분 정제되지 않고 잔류한다(Gallen *et al.*[2018]). 따라서 해양으로 방류될 가능성이 크므로 이들 물질에 대한 적극적인 관리가 필요할 것이다.

환경부에서는 육상생태계 내 피해를 예방하고 저감하기 위한 정책들이 주로 반영되어 왔으며, 해양생태계 보호와 어패류 섭취 등을 통한 인간의 건강 피해에 대한 관심은 부족하였다. 유해물질로부터 해양생태계를 보호하고 어류 섭취 등을 통한 인간의 건강 피해를 방지하기 위해서는 해상에서 배출되는 유해물질의 관리도 중요하지만 육상기인 오염물질의 배출을 저감하는 것이 필수적이다. 따라서 해양생태계 내 잔류성오염물질 관리를 위해서 정확한 조사를 통한 오염 현황 파악 및 오염원에 대한 추적이 필수적이며, 조사 자료를 토대로 부처간 협의를 통하여 해양생태계 내 POPs를 관리 해 나갈 필요가 있다.

2017년 POPs로 등재된 단쇄염화파라핀은 플라스틱의 가소제, 페인트 첨가제, 윤활유, PVC 제품의 난연제 등으로 사용되는 물질로 폴리염화비페닐, 폴리염화나프탈렌의 대체제로 알려져 있다. Reth *et al.*[2005]은 오염원이 없는 북극의 어류와 조류 등에서 단쇄염화파라핀이 검출되었다고 보고하였으며, 이는 의도적으로 합성되는 단쇄염화파라핀이 대기를 통해 장거리 이동 능력이 있음을 시사한다(Li *et al.*[2012]). 잔류성오염물질은 대기를 통한 장거리 이동 특성을 지니고 있어 대기를 통해서 해양으로 많은 양이 유입되고 있다(Moon *et al.*[2007]; Ter Schure *et al.*[2004]). 따라서 대기를 통해 해양으로 유입되는 잔류성오염물질에 대한 조사도 필요하며, 최근 해상 및 항만의 선박으로부터 배출되는 유해화학물질에 대한 관리의 필요성이 대두되고 있어 이에 대한 조사와 관련 법령 정비 등

이 필요할 것으로 판단된다. 환경부에서는 선박에서 발생하는 대기오염물질의 종류와 배출기준을 질소산화물만을 대상으로 설정하고 있으며(대기환경보전법 제76조, 시행규칙 제124조), 해양수산부에서는 해상에서의 대기오염물질에 관한 기준이 별도로 마련되어 있지 않은 실정이다.

스톡홀름 협약에 따라 POPs 검토위원회의 검토를 거쳐 POPs는 2년마다 신규물질이 등재되고 있는 상황이며, 현재 3종의 신규 후보 물질(Dicofol, Perfluorooctanoic acid(PFOA), Perfluorohexane sulfonic acid(PFHxS))이 등재되어 있다. 환경부와 해양수산부에서는 스톡홀름 협약에 따라 지속적으로 등재되고 있는 POPs에 대해 표준분석절차서를 개발하고 있으며(MOF[2016]), 개발된 절차서는 ‘잔류성유기오염물질공정시험기준’ 및 ‘해양환경공정시험기준’을 통해서 고시되고 있다. 지속적으로 신규 POPs가 등재될 것으로 예상되며, 신규 및 등재 예정인 POPs에 대한 신속한 대응과 관리를 위해서는 물질별 표준분석절차서 마련 및 시범조사가 선제적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

최근에 POPs 등재 물질은 농약류에서 산업용으로 확장되고 있으며, 협약에 등재되어 관리되고 있는 물질들의 대체물질 개발 및 사용으로 인해 이들 물질들에 대한 연구의 중요성도 대두되고 있다. 협약 등재 혹은 등재예정인 과불화화합물(PFOS, PFOA, PFHxS)의 대체물질로 PFBA(Perfluorobutanoic acid)와 같은 짧은 사슬인 과불화화합물의 사용이 늘어나고 있으며, 환경 중 이들의 농도 수준도 증가하는 추세에 있다(Meng *et al.*[2017]). 또한 브롬화 난연제로서 협약에 등재되어 있는 penta and octa-BDE mixtures, deca-BDE의 대체물질로서 사용되는 DBDPE(Decabromodiphenyl ethane)와 같은 난연제가 하수종말처리장의 슬러지 내에서 검출되기도 하였다(Lee *et al.*[2014]). 이와같이 관리 대상 유해물질들이 지속적으로 증가되고 있어 신속한 대응을 위해서는 국제 협력체계 유지 뿐만 아니라 국내 관련 부처간 긴밀한 협력체계를 구축하는 것도 중요

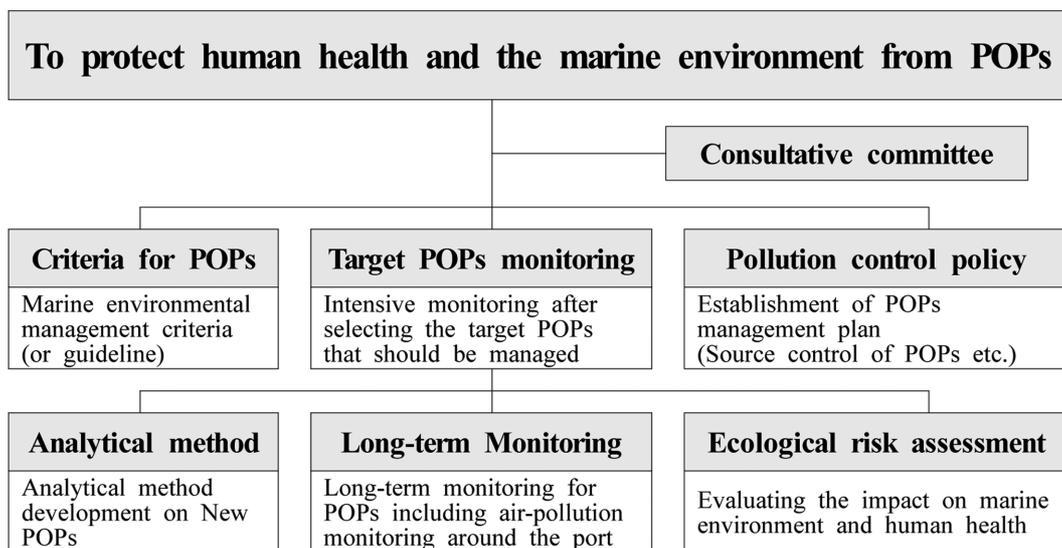


Fig. 2. Scheme of environmental monitoring and management system in marine ecosystems for POPs.

하다.

잔류성오염물질로부터 인간의 건강을 보호하고 건강한 해양생태계를 보전하기 위해서는 (1) 해양생태계 내 잔류성오염물질 측정망 구성·운영 계획을 고시하고, 중·장기적인 조사를 통해 국내 잔류성오염물질의 현황 및 장기변동을 정확하게 진단하여야 한다. 또한 (2) 정확한 자료의 생산을 위해서 새롭게 추가되는 물질에 대한 공정시험기준의 신속한 마련도 필수적이다. (3) 잔류성오염물질이 인간의 건강과 해양생태계에 미치는 위해성에 대한 연구도 필요하며, 이들 자료들을 토대로 (4) 잔류성오염물질 해양환경기준 마련 및 관리목표를 설정하는 것이 필요할 것이다. (5) 잔류성오염물질 우선관리해역 및 우선관리대상물질을 선정하여 오염원 추적을 위한 집중조사를 실시하고, (6) 해양생태계 내 잔류성오염물질의 오염을 저감시키기 위한 정책적 노력이 필요할 것으로 판단된다. 또한 (7) 잔류성오염물질 전문위원회의 구성 및 운영을 통하여 체계적인 잔류성오염물질 조사 및 관리가 필요할 것이다(Fig. 2).

## 후 기

본 연구는 ‘해양생태계 내 잔류성오염물질 조사’ 사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Anderson, T.D. and MacRae, J.D., 2006, Polybrominated diphenyl ethers in fish and wastewater samples from an area of the Penobscot River in Central Marine, *Chemosphere*, 62, 1153-1160.
- [2] Bouwman, H., Yohannes, Y.B., Nakayama, S.M.M., Motohira, K., Ishizuka, M., Humphries, M.S., van der Schyff, V., du Preez, M., Dinkelman, A. and Ikenaka, Y., 2019, Evidence of impacts from DDT in pelican, cormorant, stork, and egret eff from Kwa-Zulu-Natal, South Africa, *Chemosphere*, 225, 647-658.
- [3] Buchman, M.F., 2008, NOAA screening quick reference tables, NOAA OR&P report 08-1, Seattle WA, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, 34p.
- [4] Burton Jr., G.A., 2002, Sediment quality criteria in use around the world, *Limnology*, 3, 65-75.
- [5] Choi, M., Yun, S., Park, H.J., Lee, J.Y., Lee, I.S., Hwang, D.W., Yoon, M.C. and Choi, W.S., 2017, Concentrations and risk assessment of total mercury and methyl mercury in commercial marine fisheries from Korea, *Korean J. Fish Aquat. Sci.*, 50(6), 675-683.
- [6] Doyle, J., Solberg, T.S., Tiefenthaler Jr., J., O'Brien, G., Behnke, H.F., Poulson, H.D., Ela, J.P., Willett, S.D., Hassett, S., Smith, W.H. and Kluesner, E., 2003, Consensus-Based Sediment Quality Guidelines: Recommendations for Use & Application (Interim Guidance, RR-088).
- [7] El-Shahawi, M.S., Hamza, A., Bashammakh, A.S. and Al-Sagaf, W.T., 2010, An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants, *Talanta*, 80, 1587-1597.
- [8] Gallen, C., Eaglesham, G., Drage, D., Hue Nguyen, T. and Mueller, J.F., 2018, A mass estimate of perfluoroalkyl substance (PFAS) release from Australian wastewater treatment plants, *Chemosphere*, 208, 975-983.
- [9] Henny, C.J., Hill, E.F., Hoffman, D.J., Spalding, M.G. and Grove, R.A., 2002, Nineteenth century mercury: hazard to wading birds and cormorants of the Carson River, Nevada, *Ecotoxicology*, 11, 213-231.
- [10] Hong, S.H., Kannan, N., Jin, Y., Won, J.H., Han, G.M. and Shim, W.J., 2010, Temporal trend, spatial distribution, and terrestrial sources of PBDEs and PCBs in Masan Bay, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 60, 1836-1841.
- [11] Jacob, J. and Cherian, J., 2013, Review of environmental and human exposure to persistent organic pollutants, *Asian Social Sci.*, 9(11), 107-120.
- [12] Joe, D.J., Choi, M.S. and Kim, C., 2018, Distribution of total mercury in Korean coastal sediments, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 23(2), 76-90.
- [13] Kang, S.H., Lee, M.J., Kim, J.K., Jung, Y.J., Hur, E.S., Cho, Y.S., Moh, A. and Park, K.H., 2017, Contents of total mercury and methylmercury in deep-sea fish, tuna, billfish and fishery products, *J. Food Hyg. Safety*, 32, 42-49.
- [14] KEI, 2000, Management status and direction of response of persistent organic pollutants (POPs), Korea Environment Institute.
- [15] Kim, S.C., Jang, J.W., Kim, H.A., Lee, S.H., Jung, Y.J., Kim, J.Y., Ahn, J.H., Park, E.H., Ko, Y.S., Kim, D.S., Kim, S.Y., Jang, Y.M. and Kang, C.S., 2010, Monitoring methylmercury in abyssal fish, *Korean J. Food Sci. Technol.*, 42, 383-389.
- [16] Kim, B.H. and Lee, J.Y., 2010, Policy & management of persistent organic pollutant in Korea, *Korean Industrial Chemistry*, 13(5), 1-10.
- [17] KOEM, 2016, Analysis of methylmercury within marine sample by using gold amalgam-atomic absorption spectrometry (patent application number: 10-2016-0155483 (2016.11.22.)), Korea Marine Environment Management Corporation.
- [18] Lee, S., Song, G.J., Kannan, K. and Moon, H.B., 2014, Occurrence of PBDEs and other alternative brominated flame retardants in sludge from wastewater treatment plants in Korea, *Sci. of the Total Environ.*, 470-471, 1422-1429.
- [19] Li, Q., Li, J., Wang, Y., Xu, Y., Pan, X., Zhanf, G., Luo, C., Kobara, Y., Nam, J. and Jones, K.C., 2012, Atmospheric short-chain chlorinated paraffins in China, Japan, and South Korea, *Environ. Sci. Technol.*, 46, 11948-11954.
- [20] Luek, J.L., Dickhut, R.M., Cochran, M.A., Falconer, R.L. and Kylin, H., 2017, Persistent organic pollutants in the Atlantic and southern oceans and oceanic atmosphere, *Sci. Total Environ.*, 583, 64-71.
- [21] Mahaffey, K.R., Sunderland, E.M., Chan, H.M., Choi, A.L., Grandjean, P., Marien, K., Oken, E., Sakamoto, M., Schoeny, R.,

- Weihe, P., Yan, C.H. and Yasutake, A., 2011. Balancing the benefits of n-3 polyunsaturated fatty acids and the risks of methylmercury exposure from fish consumption, *Nutrition Reviews*, 69, 493-508.
- [22] Mason, R.P. and Lawrence, A.L., 1999, Concentration, distribution, and bioavailability of mercury and methylmercury in sediments of Baltimore Harbor and Chesapeake Bay, Maryland, USA, *Environ. Toxicol. Chem.*, 18(11), 2438-2447.
- [23] Mason, R.P., Lawson, N.N., Lawrence, A.L., Leaner, J.J., Lee, J.G. and Sheu, G.R., 1999, Mercury in the Chesapeake Bay, *Mar. Chem.*, 65, 77-96.
- [24] McCready, S., Birch, G.F., Long, E.R., Spyrikis, G. and Greely, 2006, An evaluation of Australian sediment quality guidelines, *Arch Environ. Contam. Toxicol.*, 50, 306-315.
- [25] Meng, J.M., Hong, S., Wang, T., Li, Q., Yoon, S.J., Lu, Y., Giesy, J.P. and Khim, J.S., 2017, Traditional and new POPs in environments along the Bohai and Yellow Seas: An overview of China and South Korea, *Chemosphere*, 169, 503-515.
- [26] Mergler, D., Anderson, H.A., Chan, L.H.M., Mahaffey, K.R., Murray, M. and Sakamoto, M., 2007, Methylmercury exposure and health effects in humans: A worldwide concern, *Ambio*, 36, 3-11.
- [27] MOF, 2016, Investigation of persistent organic pollutants (POPs) in marine ecosystem of Korea in 2014: Final report, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [28] Moon, H.B., Kannan, K., Lee, S.J. and Choi, M., 2007, Atmospheric deposition of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in coastal area in Korea, *Chemosphere*, 66, 585-593.
- [29] Nielsen, J.B., 1992, Toxicokinetics of mercuric chloride and methylmercuric chloride in mice, *J. Toxicol. Environ. Health*, 37, 85-122.
- [30] NIFS, 2017, Fishery environment monitoring operating instructions, National Institute of Fisheries Science.
- [31] Pozo, K., Harner, T., Lee, S.C., Wania, F., Muir, D.C.G. and Jones, K.C., 2009, Seasonal resolved concentrations of persistent organic pollutants in the global atmosphere from the first year of the GAPS study, *Environ. Sci. Technol.*, 43, 796-803.
- [32] Reth, M., Zencak, Z. and Oehme, M., 2005, New quantification procedure for the analysis of chlorinated paraffins using electron capture negative ionization mass spectrometry, *J. Chromatogr. A*, 1081, 225-231.
- [33] Samara, F., Tsai, C.W. and Aga, D.S., 2006, Determination of potential sources of PCBs and PBDEs in sediments of the Niagara River, *Environ. Pollut.*, 139, 489-497.
- [34] Sun, C.I., Kim, D.J., Lee, Y.W. and Kim, S.S., 2015, Pollution and ecological risk assessment of trace metals in surface sediments of the Ulsan-Onsan coast, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18, 245-253.
- [35] Sweetman, A.J., Valle, M.D., Prevedouros, K. and Jones, K.C., 2005, The role of soil organic carbon in the global cycling of persistent organic pollutants (POPs): Interpreting and modelling field data, *Chemosphere*, 60, 959-972.
- [36] Ter Schure, A.F.H., Larsson, P., Agrell, C. and Boon, J.P., 2004, Atmospheric transport of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls to the Baltic Sea, *Environ. Sci. Technol.*, 38, 1282-1287.
- [37] UNEP, 2019a, DDT register, <http://chm.pops.int/Implementation/Exemptions/AcceptablePurposes/AcceptablePurposesDDT/tabid/456/Default.aspx/>, 2019 (accessed 2019.07.25)
- [38] UNEP, 2019b, Stockholm convention on persistent organic pollutants, <http://chm.pops.int/TheConvention/Overview/tabid/3351/Default.aspx/>, 2019 (accessed 2019.07.25)
- [39] UNEP, 2019c, Stockholm convention on persistent organic pollutants, [http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/conf/UNEP-POPS-CONF-4-AppendixII.5206ab9e-ca67-42a7-afee-9d90720553c8.pdf#Article 8/](http://chm.pops.int/Portals/0/Repository/conf/UNEP-POPS-CONF-4-AppendixII.5206ab9e-ca67-42a7-afee-9d90720553c8.pdf#Article%208/), 2019 (accessed 2019.07.25).
- [40] Wania, F. and Mackay, D., 1996, Tracking the distribution of persistent organic pollutants, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 390A-396A.

---

Received 9 April 2019

1st Revised 10 May 2019, 2nd Revised 29 July 2019

Accepted 2 August 2019