

영일만 및 후포분지 표층퇴적물 내 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls) 분포 특성

Distribution Characteristics of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Surface Sediments of Yeongil Bay and Hupo Basin of South Korea

이창언* · 김영남* · 조동진* · 엄인권** · 최만식* · 홍성진***

Chang Eeon Lee · Young Nam Kim · Dong Jin Joe · In Kwon Um · Man Sik Choi · Seong Jin Hong

요약 본 연구에서는 한국의 영일만과 후포분지의 퇴적물 내 존재하는 폴리염화비페닐 (polychlorinated biphenyls; PCBs)의 공간 분포를 조사하였다. 영일만과 후포분지에서 표층 퇴적물을 각각 13개와 25개 정점에서 채취하여 31개의 PCBs 동족체를 기체크로마토그래피 질량분석기(GC/MSD)를 이용하여 분석하였다. PCBs는 영일만에서 3.3-64 ng g⁻¹ OC(평균: 18 ng g⁻¹ OC)로 후포분지의 PCBs 농도(0.32-38 ng g⁻¹ OC, 평균: 9.6 ng g⁻¹ OC)보다 높은 것으로 나타났다. 영일만과 후포분지 일부 정점에서 미국 NOAA의 PCBs의 퇴적물 기준인 ERL을 초과하는 것으로 나타났으나, 모든 정점에서 ERM을 초과하지는 않았다. 영일만은 저 염소화 폴리염화비페닐(Tri-CBs, Tetra-CBs)과 고 염소화 폴리염화비페닐(Penta-CBs, Hexa-CBs, Hepta-CBs)이 비슷한 비율로 나타났으나 후포분지에서는 저 염소화 폴리염화비페닐이 85%로 높은 비율을 차지하였다. 이는 영일만의 경우 주변 오염원과 대기를 통한 유입이 복합적으로 발생하지만 후포분지는 대기를 통한 유입이 우세함을 지시한다. 주성분분석을 통해 주요 오염원을 추정하였을 때, 영일만과 후포분지의 PCBs는 주로 연소기원인 것으로 나타났다. 본 연구결과는 향후 한국 연안 표층 퇴적물 내 육상기원 유해물질의 공간 분포 특성 연구에 기초자료로써 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 폴리염화비페닐, 퇴적물, 지속성유기오염물질, 영일만, 후포분지

Abstract In this study, distribution characteristics of polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface sediments collected from the Yeongil Bay and Hupo Basin in South Korea, were investigated. Thirteen and twenty-five surface sediments were collected from the Yeongil Bay and Hupo Basin, respectively, and 31 PCB congeners were quantified using GC/MSD. Concentrations of PCBs in sediments of Yeongil Bay were ranged from 3.3 to 64 ng g⁻¹ OC (mean: 18 ng g⁻¹ OC), which were greater than those of Hupo Basin (0.32-38 ng g⁻¹ OC, mean: 9.6 ng g⁻¹ OC). Concentrations of sedimentary PCBs in some sites of Yeongil Bay and Hupo Basin exceeded the sediment quality guideline (ERL) by NOAA, but the PCBs concentrations did not exceed the ERM at all sites. In Yeongil Bay, low-chlorinated PCBs (Tri- and Tetra-CBs) and highly chlorinated PCBs (Penta- to Hepta-CBs) accounted for a similar contribution, but in Hupo Basin, greater contributions of low-chlorinated PCBs were found (>85%). This indicates that in the case of Yeongil Bay, the inflow through the atmosphere and the surrounding areas occurs complexly, but in the case of the Hupo Basin, the inflow of PCBs through the atmosphere is dominant. Results for principal component analysis (PCA) revealed that major sources of PCBs in sediments of the study areas were found to be combustion origins. The results of this study will be useful as baseline information for the study of the spatial distributions of land-derived pollutants in sediments of coastal and offshore regions in South Korea.

Key words Polychlorinated Biphenyls, Sediments, Persistent Organic Pollutants, Yeongil Bay, Hupo Basin

Received: 2021.06.16, Revised: 2021.06.28, Accepted: 2021.06.28

* 충남대학교 해양환경과학과, 대전광역시(Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea, hongseongjin@cnu.ac.kr)

** 한국지질자원연구원, 대전광역시(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

*** 충남대학교 해양환경과학과, 대전광역시(Department of Marine Environmental Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea, hongseongjin@cnu.ac.kr) (교신저자)

1. 서론

폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls; PCBs)은 1881년 최초로 합성되어 변압기와 절연유, 윤활유, 잉크 등의 용도로 이용되었으며 Aroclor, Clophen, Kanechlor와 같은 다양한 제품으로 사용되었다(Erickson and Kaley, 2011). 또한 PCBs는 염소가 들어있는 물질의 열공정 과정에서 연소부산물(byproducts)의 형태로 생성되기도 한다(박 등, 2007). PCBs는 공업 폐수와 하천, 대기 등의 다양한 매질을 통해 해양 환경으로 유입된다. 환경으로 유입된 PCBs는 높은 지속성과 생물축적성, 독성으로 인하여 해양환경 및 생태계에 유해성이 보고되었고, 스톡홀름 협약에서 지속성 유기오염물질(persistent organic pollutants; POPs) 중 하나로 지정되어 1970년대부터 생산 및 사용을 규제하였다(Muir et al., 2003). 우리나라의 경우 1979년부터 변압기 등 전기기기에 PCBs 사용을 금지했으며, 1996년 6월부터는 PCBs 함유물질의 수입, 제조 및 사용을 금지하였다. 하지만 이러한 규제에도 불구하고, PCBs 특유의 높은 지속성으로 인해 40여년이 지난 지금도 여전히 해양환경 내에서 검출되고 있다(김 등, 2019). PCBs는 높은 유기탄소 분배계수(K_{oc})를 가져 퇴적물에 축적되는 특성을 보이며, 오랫동안 잔류하며 서식생물에 작간접적인 영향을 미칠 수 있다(김 등, 2019).

본 연구 지역인 영일만과 후포분지는 우리나라 동해안에 위치하여 있으며 주변에 포항과 같은 인구 밀도가 높은 도시와 복합산업단지가 위치하여 있다. 이로 인하

여 매일 290,000톤에 가까운 하수가 영일만으로 유입된다(An et al., 2021). 이 지역은 수은을 비롯한 중금속과 잔류성유해물질(persistent toxic substances)인 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons), 스티렌 올리고머(styrene oligomers), 알킬페놀(alkylphenols) 등의 오염도가 높은 것으로 알려져 있다(Hong et al., 2016; 조 등, 2018; Cha et al., 2019; Kim et al., 2019; An et al., 2021). 하지만 영일만의 높은 오염수준에도 영일만에서 해양 환경으로 이어지는 연근해역인 후포분지 내 지속성 유기오염물질 분포 특성에 관한 연구는 매우 드물다.

본 연구의 목적은 영일만과 후포분지의 표층 퇴적물 내 31개 PCBs 동족체의 농도 및 공간 분포 특성을 파악하는 것이다. 또한 이전 연구 자료와 비교를 통해 영일만과 후포분지의 오염수준을 파악하며, 통계분석을 이용하여 PCBs의 오염원을 추정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 시료채취

퇴적물 시료는 2013-2017년에 걸쳐 한국 지질자원연구원에서 연구선 탐해 2호를 통해 박스코어(box corer)를 이용하여 채취하였다(Fig. 1). 표층 약 1.0 cm 내 퇴적물 시료를 채취하여 유기용매로 세척된 125 mL 유리바틀에 옮겨 담았으며, 현장에서 냉동한 후 실험실로 운반하여 분석 전까지 -20°C 에서 보관하였다. 총 유기탄소 함량(total organic carbon; TOC) 및

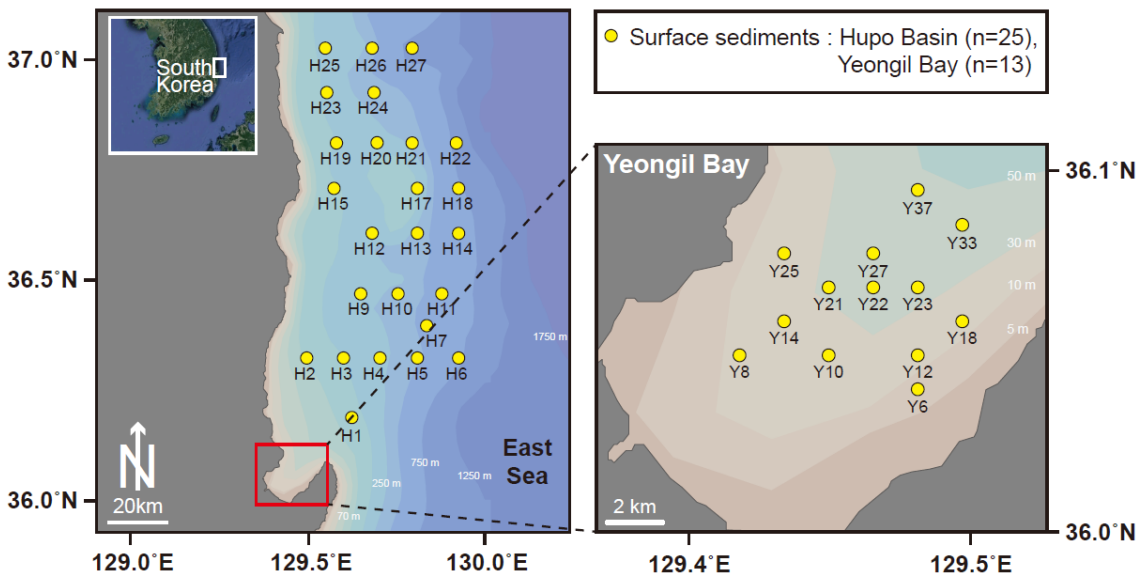


Figure 1. Map showing the study area of Yeongil Bay and Hupo Basin, South Korea

PCBs 분석을 위한 시료는 동결 건조하였고, 1 mm 체 (sieve)를 이용하여 불순물을 제거하였다.

2.2 퇴적물 유기탄소

퇴적물 내 총 유기탄소는 1 M 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 후 원소 분석기(Euro EA3028 elemental analyzer, EuroVector, Milan, Italy)를 이용하여 측정하였다.

2.3 PCBs 분석

PCBs 분석은 김 등(2019)과 동일하게 수행하였다. 동결건조 된 퇴적물 5-10 g을 유리 텀블에 옮겨 담고, 회수율 측정을 위한 내부표준물질(surrogate standard, MBP-MXE, Wellington Laboratories, Ontario, Canada)을 20 ng 첨가 후 350 mL 디클로로메탄을 이용하여 16시간 동안 속실렛 추출하였다(Hong et al., 2014). 추출된 시료는 회전 증발 농축기를 이용하여 농축하였으며 노르말헥산으로 용매를 치환하고 활성화된 구리를 이용하여 황을 제거하였다. 활성화된 실리카겔 8 g을 컬럼에 습식 충전하였으며, 약 1 mL로 농축된 추출액을 컬럼 상단에 얹은 후, 노르말헥산 30 mL를 이용하여 용리시켰다. 이후 추출액을 회전 농축하였고 노르말헥산으로 용매 치환한 후 농축 시험관으로 옮겼으며, 초고순도 질소가스(99.999%)를 이용하여 최종 1 mL로 농축하였다. 농축액은 기기분석 전에 내부표준물질(2-fluorobiphenyl, Sigma-Aldrich, Saint Louis, MO) 100 ng을 첨가하였다.

PCBs의 정량분석은 가스크로마토그래피 질량분석기(7890B GC & 5977B MSD, Agilent Technologies, Santa Clara, CA)를 이용하여 수행되었다. HP-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm film) 컬럼을 이용하여 총 31개 PCBs 동족체를 분리 및 분석하였다. 오븐 승온 조건은 최초 60 °C에서 1분간 유지하고 140 °C까지 5 °C/분으로 승온한 뒤 1분간 유지하였다. 이후 200 °C까지 30 °C/분으로 승온하여 1분간 유지하였고, 250 °C까지 4 °C/분으로 승온한 뒤 5분간 유지하였으며, 최종적으로 300 °C까지 10 °C/분으로 승온하고 1분간 유지하였다. SIM(selected ion monitoring) 모드로 분석

하였으며, 분석에 이용되는 정량 및 정성 이온은 Table 1과 같다.

2.4 정도관리

유기추출 전 첨가한 내부 표준물질의 회수율 평가는 탄소안정동위원소로 질량 표지된(¹³C-labeled) 7개 화합물(CB 28, 52, 101, 153, 138, 180, 209)로 수행되었으며, 회수율은 72–126%(평균 94%)의 범위였다. 방법 검출한계 계산을 위해 저농도 표준용액을 7회 반복 분석하였으며, 각 화합물별 검출한계는 0.018(CB 70)–0.031(CB 28) ng g⁻¹의 범위를 보였다.

2.5 통계분석

퇴적물 내 PCBs의 기원을 추정하기 위하여 SPSS 26.0(SPSS Inc., Chicago, IL)을 이용하여 통계분석을 수행하였다. 문헌에서 보고된 제품 및 연소 기원에서 분석된 7개 PCBs 동족체(CB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)의 상대적인 조성을 이용하였으며(Ikonomou et al., 2002; Pedersen et al., 2015), 본 연구의 PCBs 조성자료와 함께 주성분 분석(principle component analysis; PCA)을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 영일만, 후포분지의 총 유기탄소 함량과 PCBs 공간 분포 특성

영일만과 후포분지의 총 유기탄소 함량 (total organic carbon)은 각각 평균 0.93%, 1.9%로 후포분지에서 상대적으로 높은 유기탄소 함량을 보였다. 총 유기탄소 함량은 후포 분지 정점 중에서 연안에 가까운 H1 정점에서 3.1%로 가장 높았으며, 후포 분지 중심 지역에 위치한 H26, H22, H27 정점에서 각각 3.0%, 2.9%, 2.8% 순으로 나타났다. 남서풍에 의해 동해 연안을 따라 북향하는 해류의 흐름은 울산과 후포 앞바다에서 시계방향의 소규모 와류를 형성하게 되는데(김 등, 2017), 이 와류를 통해 유기물질이 후포분지에 쌓일 수 있다.

Table 1. Monitoring ions for quantitative and qualitative analyses of PCBs in the GC-MSD

Target compounds		Monitoring ions	
Cl number	Congener No.	Quantification ion (m/z)	Confirmation ion (m/z)
Tri-CBs	28, 37	256	258
Tetra-CBs	52, 49, 44, 74, 70, 66, 60, 77	292	290
Penta-CBs	101, 99, 87, 82, 114, 105, 118, 126	326	328
Hexa-CBs	153, 138, 158, 166, 128, 156, 169	360	362
Hepta-CBs	179, 187, 183, 180, 170, 189	394	396

PCBs의 농도 분포는 총 유기탄소 함량의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 보다 정확한 지역 비교를 위해 PCBs의 농도를 총 유기탄소함량으로 표준화하였다. 그 결과 PCBs는 영일만에서 $2.0 - 110 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$ (평균: $29 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$)의 농도 분포를 보였으며, 후포분지에서 $0.31 - 15 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$ (평균: $4.2 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$)으로 영일만에서 평균적으로 높은 PCBs 농도 분포를 보였다(Fig. 2). 영일만 내 정점 중 Y27 정점에서 $110 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$ 로 가장 높은 농도를 보였으며 Y18, Y37 정점이 각각 $54, 51 \text{ ng g}^{-1} \text{ OC}$ 으로 상대적으로 높은 농도를 보였다. 영일만 내 높은 농도의 PCB는 인근에 위치한 포항시와 대규모 공업단지로부터 기인하여 생활하수나 공업폐수를 통해 유입되었을 것으로 생각된다. 기존 문헌에서도 PCBs를 포함한 다환방향족탄화수소와 알킬페놀 등의 잔류성독성물질이 포항 지역에 높은 농도로 분포하고 있음이 보고된 바 있고, 주변 오염원으로부터 기인되었음을 보여주었다(Hong et al., 2016; Cha et al., 2019; Kim et al., 2019; An et al., 2021).

본 연구에서 검출된 PCBs 농도 중 영일만의 경우 2개 정점에서(Y18: $64 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$; Y27: $31 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) 미국의 국립해양대기국(NOAA)에서 제한한 퇴적물 기준인 ERL(effect range low, 10% 이상의 저서생물에게 악영향을 미칠 수 있는 농도) $22.7 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ 보다 높았지만, ERM(effect range median, 50% 이상의 저서생물에게 악영향을 미칠 수 있는 농도) $180 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ 에 비해 낮은 수준을 보였다. 후포분지는 3개 정점에서(H2: $34 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$; H20: $38 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$; H26: 23

$\text{ng g}^{-1} \text{ dm}$)에서 ERL보다 높았지만, ERM을 초과하는 정점은 없었다.

3.2 국내 서해, 남해, 동해 연안 지역과 비교

서해 연안 지역에서 이전에 보고된 PCBs 농도는 아산만 $1.9 - 3.3 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $2.3 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Choi et al., 2014), 새만금 $1.2 - 1.8 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $1.5 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Choi et al., 2014), 서해연안 $0.27 - 16 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $2.1 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Hong et al., 2006)으로, 본 연구지역에서 비교적 높은 농도의 PCBs가 검출되었음을 알 수 있었다(Fig. 3). 경기만은 $11 - 580 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $200 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Lee et al., 2001)으로 모든 지역 중 가장 높은 농도를 보였다.

남해 연안 및 만에서 이전에 보고된 PCBs 농도는 광양만 $0.2 - 2.9 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $1.4 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Hong et al., 2005), 진해만 $0.50 - 8.8 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $2.8 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$), 남해 연안 $0.10 - 1.1 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $0.49 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Kim et al., 2021)이었다. 남해 연안 $0.14 - 200 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $12 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Hong et al., 2006)은 본 연구지역과 유사한 농도 수준을 보였으며, 부산만 $5.7 - 200 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $58 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Hong et al., 2015)에 비해서는 낮았다.

동해 연안 지역에서 보고된 PCBs 농도는 $0.29 - 4.9 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $2.3 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Kim et al., 2021)이었으며, 본 연구지역에서 상대적으로 높은 농도가 검출되었다. 영일만 $0.60 - 73 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$ (평균: $15 \text{ ng g}^{-1} \text{ dm}$) (Hong et al., 2000)은 본 연구지역과 유사한 수준

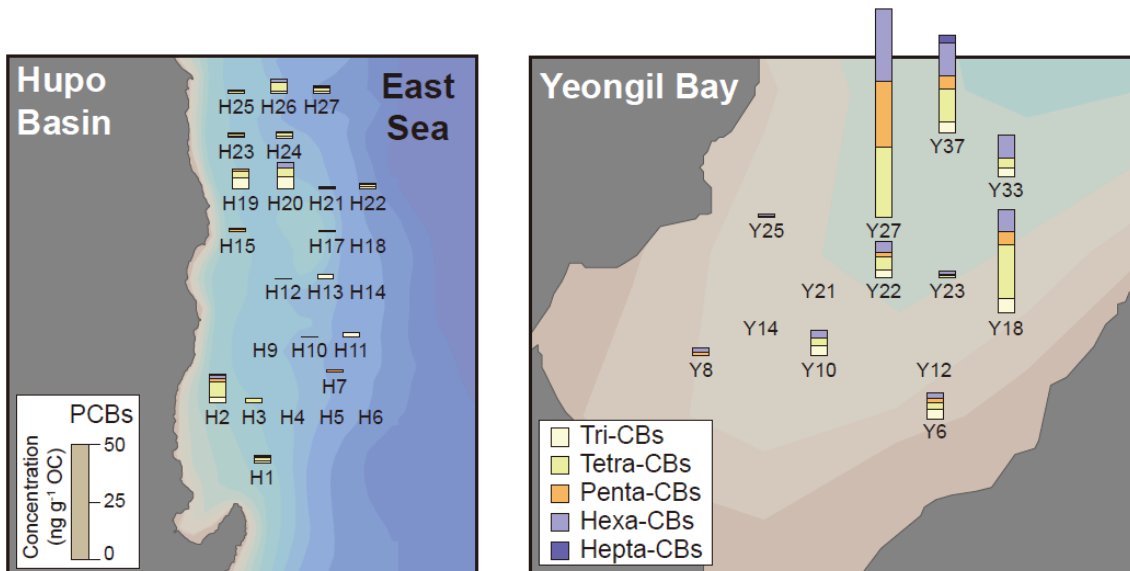


Figure 2. Distributions of PCBs in sediments of Hupo Basin and Yeongil Bay, South Korea

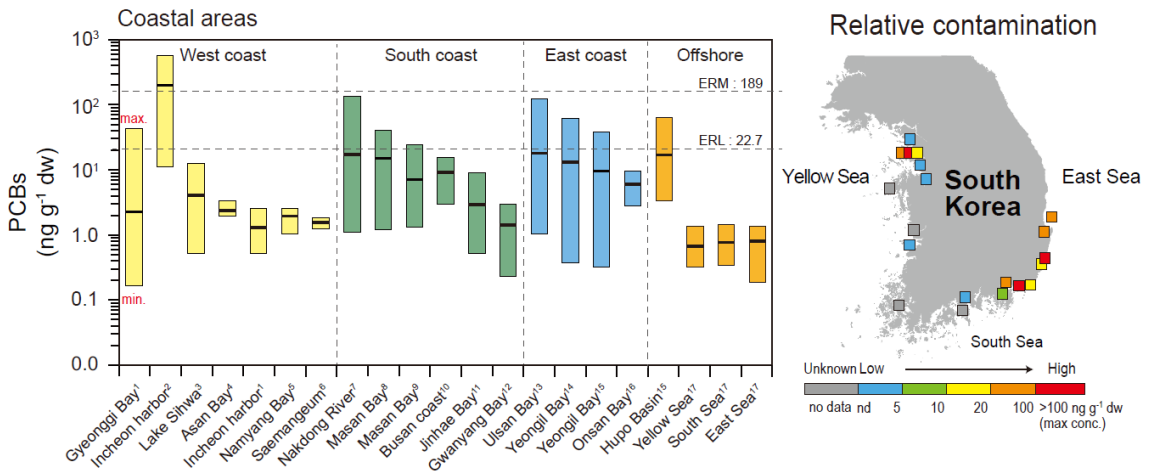


Figure 3. Comparison of concentrations of sedimentary PCBs in coastal areas of South Korea and those obtained from this study

이었으며, 울산만 1.2–140 ng g⁻¹ dm(평균: 31 ng g⁻¹ dm) (Choi et al., 2005) 보다는 낮은 수준을 보였다.

전체적으로 동해에서 높은 PCBs 농도가 나타났다. 총 21개 연구지역 중 ERL을 초과한 지역은 9개, ERM을 초과한 지역은 1개(인천항)로 나타났다(Fig. 3). 인천항에서 나타난 높은 PCBs 농도는 항구 근처에 산업화 초기에 생긴 오래된 공업단지에서 유입된 것일 가능성이 있다(Lee et al., 2001). 낙동강 또한 인근 공장에서 유입된 것으로 보이며(Jeong et al., 2001), 울산만도 주변에 있는 공업단지의 영향을 받은 것으로 보인다(Choi et al., 2001).

3.3 퇴적물 내 PCBs의 동족체 조성

영일만 표층 퇴적물 내 PCBs 동족체 분포를 보면 Tetra-CBs가 35%로 가장 높게 나타났고, Hexa-CBs(33%), Penta-CBs(19%), Tri-CBs(12%), Hepta-CBs(1.4%) 순으로 나타났다(Fig. 2). 후포 분지 표층 퇴적물 내 PCBs 동족체 분포는 Tetra-CBs가 40%로 가장 높게 나타났고, Tri-CBs(35%), hexa-CBs(13%), Penta-CBs (12%), Hepta-CBs(0.84%) 순으로 나타났다. 영일만에서는 저염소치환체(Tri-, Tetra-)와 고염소치환체(Penta-, Hexa, Hepta-)가 각각 47, 53%로 나타난 반면, 후포분지에서는 저염소치환체가 85%로 고염소치환체에 비해 상대적으로 높은 비중을 차지했다.

이전 연구에 따르면, 한국의 연안 지역 중 산업이 발

달된 지역 또는 항만이 위치한 지역의 PCBs는 고염소치환체의 비중이 높은 것으로 알려져 있다(김 등, 2019; Choi et al., 2011a, 2014). 또한 PCBs는 저염소치환체(Mono-, Di-, Tri-, Tetra-CBs)가 고염소치환체(Penta-, Hexa-, Hepta-, Octa-, Nona-, Deca-CBs)보다 강이나 대기를 통해 더 멀리까지 전달되며 대기를 통해 PCBs가 유입된 경우 저염소치환체의 비율이 고염소치환체의 비율보다 상대적으로 높은 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다(김 등, 2005; Beyer and Biziuk, 2009). 따라서 영일만 내 PCBs의 경우 주변에 발달된 도시와 공업단지를 통한 유입과 대기를 통한 유입이 복합적으로 기인하고 있으며, 상대적으로 오염원으로부터 떨어진 곳에 위치한 후포 분지의 경우 대기를 통한 유입이 주된 유입경로로 생각된다. 또한 기존 연구에서도 오염원에서 멀어짐에 따라 PCBs 조성이 자연적인 분별(fractionation) 현상을 나타냈다고 보고된 바 있다(김 등, 2019). 따라서, 상대적으로 오염원과 가까이 위치한 영일만에서 후포분지로 멀어짐에 따라 PCBs의 분별 현상이 나타나는 것으로 볼 수 있다.

3.4 퇴적물 내 PCBs의 오염원 추정

PCBs의 오염원을 파악하기 위해 기존 연구를 통해 파악된 조성을 이용하여 주성분 분석을 수행하였다. PCBs의 제품 기원으로는 Aroclors 5종, Kanechlors 5종, Clophens 2종의 조성을 이용하였다(Pedersen et

al., 2015). 연소 기원으로는 Ikonomou et al. (2002)에서 보고된 목재 연소, 음식물 폐기물 연소, 가연성 물질 연소 등의 11가지 잠재적 오염원의 조성을 이용하여 통계 분석을 수행하였다. 주성분분석은 31개의 PCBs 동족체 중 오염원의 조성고 공통된 7개의 PCBs 동족체(CB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)를 이용하였다. 분석값이 검출한계보다 낮을 경우 통계분석을 위해 검출한계 값을 대입하여 진행하였다. 주성분분석 결과 주성분 1(PC1)이 총 변량의 37%, 주성분 2(PC2)는 20%로 전체의 57%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 4). PC1에서는 CB 153, 138, 180이 높은 상관성을 보였으며, PC2에서는 CB 101, 52, 118이 높은 상관성을 보였다.

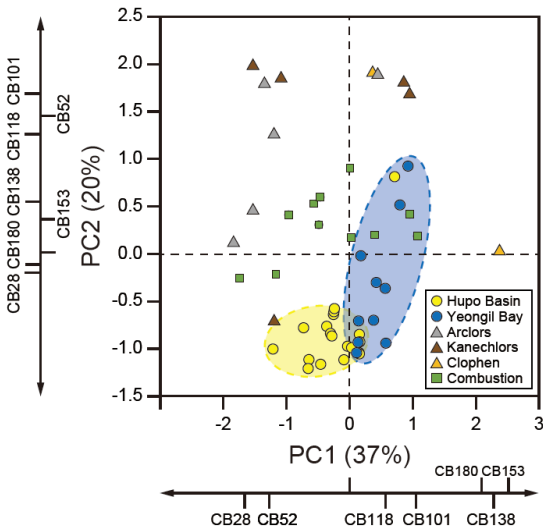


Figure 4. Result of principal component analysis (PCA) of individual PCBs in sediment samples collected from the Yeongil Bay and Hupo Basin of South Korea and in potential sources

본 연구의 표층 퇴적물 시료는 크게 2가지 그룹의 형태로 구분되었다. 영일만 정점의 경우 PC1의 양의 방향에 위치하였고 생활 폐기물 연소기원, 소각장 기원과 동일한 그룹을 형성하였다. 이는 영일만 퇴적물 시료 내 PCBs는 주변 도시 지역에서 발생하는 생활 폐기물의 연소기원과 소각장 연소 기원의 복합 연소 기원으로부터 기인했음을 의미한다. 후포분지의 H15 정점을 제외한 모든 퇴적물 시료는 영일만 그룹에 비해 PC1의 음의 방향에 위치하였다. 즉, 후포 분지 내 PCBs는 영일만 정점에 비해 상대적으로 저염소치환체(CB28, 52)의 영향을 많이 받았음을 보여주었다. 하지만 후포분지 그룹의 경우 기존 문헌의 제품기원과 및

연소기원과 통계적으로 유의하지 않았는데, 이는 영일만 주변에서 발생한 PCBs가 대기를 통해 유입되면서 자연적 분별 작용을 통해 조성이 변화하였기 때문으로 생각된다. 하지만 PC1과 PC2의 설명력이 57%로 전체 경향을 대변하기에는 다소 부족하기 때문에 향후 더 자세한 오염원 추적 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 한국의 영일만과 후포분지 표층 퇴적물 내 PCBs의 공간분포 특성과 잠재적 오염원에 대해 조사하였다. 높은 잔류성으로 인해 사용이 금지된 물질임에도 불구하고 PCBs는 연구지역의 퇴적물에서 검출되었으며, 몇몇 정점에서는 미국 NOAA의 퇴적물 기준(ERL)보다 높게 검출되기도 했다. 따라서 PCBs에 대한 지속적인 조사와 오염원 및 오염경로에 대한 연구는 향후 더 필요할 것으로 보인다. 본 연구결과는 한국 연안 표층 퇴적물 내 육상기원 유해물질의 공간 분포 특성 연구에 기초자료로서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비로 지원되었습니다.

참고문헌

1. 김경수, 송병주, 박석운, 김종국, 2005. 공단지역 대기 중 PCBs의 오염농도 및 발생원 추정. *대한환경공학회지* 27:385-389.
2. 김동선, 서호산, 정용현, 2017. 수치실험에 의한 한국 동해 연안용승해역의 영양염 분포 특성. *수산해양교육연구*, 29(6):1808-1818
3. 김석구, 이미경, 안재환, 강성원 전상호, 2005. 퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향. *대한환경공학회지*, 27:923-931
4. 김영남, 안윤영, 윤서준, 정희동, 김종성, 홍성진, 2019. 한국 주변해역 표층 퇴적물 내 폴리염화비닐(PCBs)의 공간 분포 특성. *한국수호학회지*, 8(2):19-27
5. 이동훈, 김교근, 2002. 인천연안 퇴적물 중 PCB의 분포. *Anal. Sci. Tech.*, 15(3):287-299.
6. 조동진, 최만식, 김찬국, 2018. 한반도 연안역 표층퇴적물 내 총 수은 분포 특성. *The sea* 23, 76-

- 90.
7. 최성득, 백송이, 장윤석, 윤영준, 박병권, 홍성민, 2007. 남극 세종기지에서의 대기 중 PCB 모니터링. *Ocean Polar Res.* 29(4):297-302.
 8. Beyer, A., Biziuk, M., 2009. Environmental fate and global distribution of polychlorinated biphenyls. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 201:137-158.
 9. Breivik, K., Sweetman, A., Pacyna, J.M., Jones, K.C., 2007. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners--a mass balance approach 3. An update. *Sci. Total Environ.* 377(2-3):296-307.
 10. Choi, H.G., Moon, H.B., Choi, M., Yu, J., 2011a. Monitoring of organic contaminants in sediments from the Korean coast: spatial distribution and temporal trends (2001-2007). *Mar. Pollut. Bull.* 62:1352-1361.
 11. Choi, H.G., Kim, S.-S., Moon, H.-B., Lee, P.-Y., 2001. Horizontal and vertical profiles of PCBs in sediments from southeastern coastal areas of Korea. *Ocean Sci. J.* 36:93-100.
 12. Choi, J.Y., Yang, D.B., Hong, G.H., Shin, K.H., 2014. Distribution and bioaccumulation of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides residues in sediments and Manila clams (*Ruditapes philippinarum*) from along the Mid-Western coast of Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 85:672-678.
 13. Choi, J.-Y., Lee, S.-G., Bang, J.-H., Yang, D.-B., Hong, G.-H., Shin, K.-H., 2011b. On the distribution of PCBs and organochlorine pesticides in fish and sediment of the Asan Bay. *Ocean Polar Res.* 33:45-53.
 14. Hong, S., Khim, J.S, Park, J., Kim, S., Lee, S., Choi, K., Kim, C., Choi, S.-D., Park, J., Ryu, J., Jones, P.D., Giesy, J.P., 2014. Instrumental and bioanalytical measures of dioxin-like compounds and activities in sediments of the Pohang Area, Korea. *Sci. Total Environ.* 470-471:1517-1525.
 15. Hong, S., Shin, K.-H., 2009. Alkylphenols in the core sediment of a waste dumpsite in the East Sea (Sea of Japan), Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 58:1566-1571.
 16. Hong, S.H., Yim, U.H., Shim, W.J., Oh, J.R., Lee, I.S., 2003. Horizontal and vertical distribution of PCBs and chlorinated pesticides in sediments from Masan Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 46:244-253
 17. Hong, S.H., Yim, U.H., Shim, W.J., Oh, J.R., 2004. Environmental occurrence of persistent organochlorines in Gwangyang Bay. *Korean J. Environ. Biol.* 22:30-37.
 18. Hong, S.H., Yim, U.H., Shim, W.J., Oh, J.R., 2005. Congener-specific survey for polychlorinated biphenyls in sediments of industrialized bays in Korea: regional characteristics and pollution sources. *Environ. Sci. Technol.* 39:7380-7388.
 19. Hong, S., Yim, U., Shim, W., Li, D., Oh, J., 2006. Nationwide monitoring of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments from coastal environment of Korea. *Chemosphere* 64:1479-1488.
 20. Hong, S.H., Kannan, N., Jin, Y., Won, J.H., Han, G.M., 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
 21. Huang, Y.-J., Lee, C.-L., Fang, M.-D., 2011. Distribution and source differentiation of PAHs and PCBs among size and density fractions in contaminated harbor sediment particles and their implications in toxicological assessment. *Mar. Pollut. Bull.* 62:432-439.
 22. Ikonomou, P. Sather, Jeong-Eun Oh, Won-Yong Choi, and Yoon-Seok Chang, 2002. PCB levels and congener patterns from Korean municipal waste incinerator stack emissions. *Chemosphere* 49:205-216.
 23. Jeong, G.H., Kim, H.J., Joo, Y.J., Kim, Y.B., So, H.Y., 2001. Distribution characteristics of PCBs in the sediments of the lower Nakdong River, Korea. *Chemosphere* 44:1403-1411.
 24. Jung, J.-H., Hong, S.H., Yim, U.H., Ha, S.Y., Shim, W.J., Kannan, N., 2012. Multiple in vitro bioassay approach in sediment toxicity evaluation: Masan Bay, Korea. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 89:32-37.
 25. Khim, J.S., Lee, K., Kannan, K., Villeneuve, D., Giesy, J., Koh, C., 2001. Trace organic contaminants in sediment and water from Ulsan Bay and its vicinity, Korea. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 40:141-150.
 26. Khim, J.S., Kannan, K., Villeneuve, D.L., Koh,

- C.H., Giesy, J.P., 1999. Characterization and distribution of trace organic contaminants in sediment from Masan Bay, Korea. 1. Instrumental analysis. *Environ. Sci. Technol.* 33:4199-4205.
27. Kim, P.-G., Park, M.-E., Sung, K.-Y., 2009. Distribution of heavy metals in marine sediments at the ocean waste disposal site in the Yellow Sea, South Korea. *Geosci. J.* 13:15-24.
28. Koh, C.-H., Khim, J.S., Villeneuve, D.L., Kannan, K., Giesy, J.P., 2006. Characterization of trace organic contaminants in marine sediment from Yeongil Bay, Korea: 1. Instrumental analyses. *Environ. Pollut.* 142:39-47.
29. Koh, C.-H., Khim, J.S., Villeneuve, D.L., Kannan, K., Johnson, B.G., Giesy, J.P., 2005. Instrumental and bioanalytical measures of dioxin-like and estrogenic compounds and activities associated with sediment from the Korean coast. *Ecotoxicol. Environ. Safe.* 61:366-379.
30. Koh, C.-H., Khim, J.S., Villeneuve, D.L., Kannan, K., Giesy, J.P., 2002. Analysis of trace organic contaminants in sediment, pore water, and water samples from Onsan Bay, Korea: instrumental analysis and in vitro gene expression assay. *Environ. Toxicol. Chem.* 21:1796-1803.
31. Kim, Y.N., Hong, S., Lee, J.H., Yoon, S.J., An, Y., Kim, M.S., Jeong, H.D., J.S., 2021. Spatial distribution and source identification of traditional and emerging persistent toxic substances in the offshore sediment of South Korea. *Sci. Total Environ.* 789:147996.
32. Lee, K.-T., Tanabe, S., Koh, C.-H., 2001a. Contamination of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments from Kyeonggi Bay and Nearby Areas, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 42(4):273-279.
33. Lee, K.-T., Tanabe, S., Koh, C.-H., 2001b. Distribution of organochlorine pesticides in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea. *Environ. Pollut.* 114:207-213.
34. Li, Y., Duan, X., 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of China Sea. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:15432-15442.
35. Muir, D., Savinova, T., Savinov, V., Alexeeva, L., Potelov, V., Svetochv, V., 2003. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia. *Sci. Total Environ.* 306(1):111-131.
36. Shim, W.J., Hong, S.H., Yim, U.H., Li, D., Kannan, N., 2010. Occurrence and spatial distribution of organic contaminants in sediments from Chinhae Bay, Korea. *J. Toxicol. Environ. Health Sci.* 2:119-124.
37. Song, K.-H., Choi, K.-Y., Kim, C.-J., Kim, Y.-I., Chung, C.-S., 2015. Assessment of the governance system for the management of the East Sea-Jung dumping site, Korea through analysis of heavy metal concentrations in bottom sediments. *Ocean Sci. J.* 50:721-740.
38. Wania, F., Mackay, D., 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Technol.* 30(9):390A-396A.
39. Pedersen, K.B., Lejon, T., Jensen, P.E., Ottosen, L.M., 2015. Chemometric analysis for pollution source assessment of harbour sediments in Arctic locations. *Water Air Soil Pollut.* 226:150.
40. Zhang, P., Song, J., Liu, Z., Zheng, G., Zhang, N., He, Z., 2007. PCBs and its coupling with eco-environments in Southern Yellow Sea surface sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 54:1105-1115.