# 한국 주변해역 표층 퇴적물 내 폴리염화비페닐(PCBs)의 공간 분포 특성

## Spatial Distributions of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Surface Sediments of Coastal and Offshore Areas of South Korea

김영남* · 안윤영* · 윤서준** · 정희동*** · 김종성** · 홍성진*
Young Nam Kim · Yoon Young An · Seo Joon Yoon · Hee Dong Jeong · Jong Seong Khim · Seong Jin Hong

**요 약** 본 연구에서는 한국 연안 및 근해역 표층 퇴적물 내 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls; PCBs)의 공간 분포 특성 및 조성을 조사하였다. 2017-2018년에 서해 18정점, 남해 10정점, 동해 6정점에서 표층 퇴적물을 채취하여 총 31개의 PCBs 동족체를 기체크로마토그래피 질량분석기(GC/MSD)를 이용하여 분석하였다. PCBs 농도는 서해, 남해, 동해에서 각각 0.37−6.9 ng $g^{-1}$ OC (평균: 1.4 ng $g^{-1}$ OC), 0.16−1.6 ng $g^{-1}$ OC (평균: 0.62 ng $g^{-1}$ OC), 0.59−1.8 ng $g^{-1}$ OC (평균: 1.0 ng $g^{-1}$ OC)로 측정되었다. 퇴적물 내 PCBs 농도는 입도 및 유기탄소 농도에 의존적인 경향을 보였고, 이전에 한국 연안에서 보고된 PCBs 농도와 비슷하거나 낮은 수준을 보였다. 세 해역 모두에서 저염소치환체인 Tri-와 Tetra-CBs의 비율이 70% 이상으로 나타났고, 이는 대기를 통한 유입이 우세함을 지시한다. 주성분 분석을 통해 오염원을 추정하여 보았을 때 한국 서해, 남해 및 동해 퇴적물 내 PCBs는 제품 및 연소 기원이 혼합된 형태로 나타났다. 본 연구결과는 한국 전체 연안 퇴적물의 재질분포도를 작성함에 있어 육상기원 유해물질에 대한 내용을 포함시킬 수 있다는 점에서 의의를 가지며, 향후 국가 해양기본도에 해양환경에 관련된 자료가 포함되어야 할 것이다.

**키워드** 폴리염화비페닐, 퇴적물, 총유기탄소, 지속성유기오염물질, 국가해양기본도

**Abstract** In this study, spatial distributions and compositions of polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface sediments collected from the West, South, and East Seas, South Korea, were investigated. A total of 31 PCB congeners was analyzed in surface sediments from 18 sites in West Sea, 10 sites in South Sea, and 6 sites in East Sea from 2017 to 2018 by use of gas chromatography-mass selective detector (GC/MSD). Concentrations of PCBs in sediments of West Sea, South Sea, and East Sea were detected ranging from 0.37 to 6.9 ng $g^{-1}$ OC (mean: 1.4 ng $g^{-1}$ OC), 0.16 to 1.6 ng $g^{-1}$ OC (mean: 0.62 ng $g^{-1}$ OC), and 0.59 to 1.8 ng $g^{-1}$ OC (mean: 1.0 ng $g^{-1}$ OC), respectively. The concentrations of sedimentary PCBs tended to be dependent on the grain size and total organic carbon contents, and were generally similar to or lower than those previously reported concentrations at the coastal areas of South Korea. The relative contributions of low-chlorinated CBs such as tri- and tetra-CBs were above 70% in the study areas, indicating that the atmospheric inputs were predominant. Results for principal component analysis (PCA) revealed that major sources of PCBs in sediments of the coastal and offshore areas were a mixture of products and combustion origins. The results of this study will be useful as baseline information for the study of the spatial distributions and characteristics of land-derived organic pollutants in sediments of coastal and offshore regions in South Korea.

**Key words** Polychlorinated biphenyls, Sediments, Total organic carbon, Persistent organic pollutants, Basic maps of the sea

Received: 2019.12.23, Revised: 2019.12.26, Accepted: 2019.12.26

* 충남대학교 해양환경과학과, 대전광역시(Department of Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea)
** 서울대학교 지구환경과학부, 서울특별시(School of Earth and Environmental Sciences & Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea)
*** 국립수산과학원 동해수산연구소 자원환경과, 강원도 강릉시(East Sea Fisheries Research Institute, National Institute of Fisheries Science, Gangneung 25435, Republic of Korea)

## 1. 서 론

스톡홀름 협약에서 지정한 지속성 유기 오염물질(persistent organic pollutants; POPs) 중 하나인 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls; PCBs)은 두 개의 벤젠고리에 염소가 결합된 형태의 화학물질이다. 염소 원자의 수와 치환된 위치에 따라 이론적으로 총 209개의 동족체(congener)를 가질 수 있으며, 화합물 특유의 절연성, 난연성으로 인해 변압기, 차단기의 절연유, 전자기기 등 다양한 용도로 사용되었다. 그러나 이들의 환경 내 높은 지속성, 생물 축적성 및 독성으로 인해 여러 가지 환경적, 그리고 생태적인 위해성이 보고되어 왔다(Muir et al., 2003). 특히, PCBs는 높은 유기탄소 분배계수($K_{OC}$)를 가져 화합물이 해양환경에 유입되었을 때 입자에 흡착 및 퇴적물에 축적되는 경향을 보이며 쉽게 분해되지 않고 오랫동안 잔류하고 서식생물에 직간접적인 영향을 미치게 된다.

PCBs는 미국의 Arochlor, 독일의 Clophen 등의 제품에 고농도로 함유되어 있고, 이들 제품과 폐기물의 소각 부산물을 통해 환경 내로 유입되는 것으로 알려져 있다(Breivik et al., 2007). PCBs는 일차적으로 대기를 통한 유입이 우세하며 이후 환경 매체 내 높은 지속성으로 인해 대기 및 해수를 통해 장거리 이동을 하는 것으로 알려져 있다(Wania and Mackay, 1996). 따라서 PCBs는 육상의 토양, 연안 퇴적물뿐만 아니라 외양과 극지에서도 발견된다(최 등, 2007). 저염소화된 PCBs는 상대적으로 높은 휘발성으로 인해 더 먼 지역으로 이동할 수 있는 것으로 알려져 있다(Wania and Mackay 1996).

PCBs의 높은 생태 위해성으로 인해 1970년대부터 유럽 국가들을 중심으로 PCBs의 생산 및 사용이 금지되었다. 우리나라의 경우 1979년부터 변압기 등 전기기기에 PCBs 사용을 금지했으며, 1996년 6월부터는 PCBs 함유물질의 수입, 제조 및 사용을 금지했다. 하지만 높은 지속성으로 인해 40여년이 지난 지금도 여전히 PCBs는 환경 매질 내에서 검출되고 있다. 현재까지 PCBs의 분포에 대한 연구는 주로 연안지역 퇴적물 및 생물 축적에 집중되어 왔으며 외양지역의 분포에 대한 연구는 상대적으로 빈약하다.

본 연구 지역인 서해 및 남해 해역 주변에는 한강, 영산강, 섬진강, 낙동강 등 대형 강이 위치해 있으며, 이를 통해 많은 양의 담수가 유입되는 지역이다. 동해의 경우, 대형 강을 통한 직접적인 담수 유입은 없으나, 대한해협을 통한 쿠로시오 해류의 유입으로 해수 순환이 이루어지는 지역이다. 본 연구 정점은 연안 지역과 비교적 외양인 지역을 모두 포함하고 있으며, 담수 유입 및 대기 침전 등을 통해 육상기원 유해물질이 유입될 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구의 목적은 서해, 남해, 동해의 표층 퇴적물 내 31개 PCBs 동족체의 농도 및 공간 분포 특성을 파악하는 것이다. 또한 이전 연구 자료와 비교 및 통계분석을 통해 각 해역 내 PCBs의 기원을 추정하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시료채취

서해 퇴적물 시료는 국립수산과학원에서 수행하는 서해정선조사의 일환으로 2017년 8월에 반빈그랩(Van Veen grab sampler)을 이용하여 채취하였다. 남해와 동해 퇴적물 시료는 각각 2018년 5월, 2017년 5월에 연구선 나라호를 이용하여 박스코어(box corer)로 채취하였다(Fig. 1). 표층 약 1.5 cm 내 퇴적물 시료를 채취하여 유기용매로 세척된 125 mL 유리용기에 옮겨 담았으며, 현장에서 드라이아이스를 이용하여 냉동한 후 실험실로 운반하여 분석 전까지 -20 ℃에서 보관하였다. 총 유기탄소 함량(total organic carbon; TOC) 및 PCBs 분석을 위한 시료는 동결 건조하였고, 1 mm 체(sieve)를 이용하여 불순물을 제거하였다.

### 2.2 퇴적물 기본항목 분석

퇴적물의 함수율과 니질 함량은 각각 오븐 건조 및 습식 체질하여 무게차를 이용해 측정하였다. 퇴적물 내 TOC는 1 M 염산을 이용하여 무기탄소를 제거한 후 원소 분석기(Euro EA3028 elemental analyzer, EuroVector, Milan, Italy)를 이용하여 측정하였다.

### 2.3 PCBs 분석

동결건조 된 퇴적물 10 g을 유리 팀블에 옮겨 담고, 350 mL 디클로로메탄을 이용하여 16시간 동안 속실렛 추출하였다 (Hong et al., 2014). 회수율 측정을 위해 추출 전 내부 표준물질(surrogate standard, MBP-MXE, Wellington Laboratories, Ontario, Canada) 20 ng을 모든 실험구에 첨가하였다. 추출된 시료는 회전증발 농축기를 이용하여 농축하였으며 노르말헥산으로 용매를 치환하였다. 이후 활성화 된 구리를 이용하여 황을 제거하였다. 8 g의 활성화된 실리카겔을 컬럼에 채워 정제하였으며, 정제에 사용한 용매는 노르말헥산: 디클로로메탄 (80:20, v/v) 혼합용매 60 mL를 사용하였다. 이후 추출액은 회전 농축하였고 노르말헥산으로 용매 치환한 후 농축 시험관으로 옮겼으며 초고

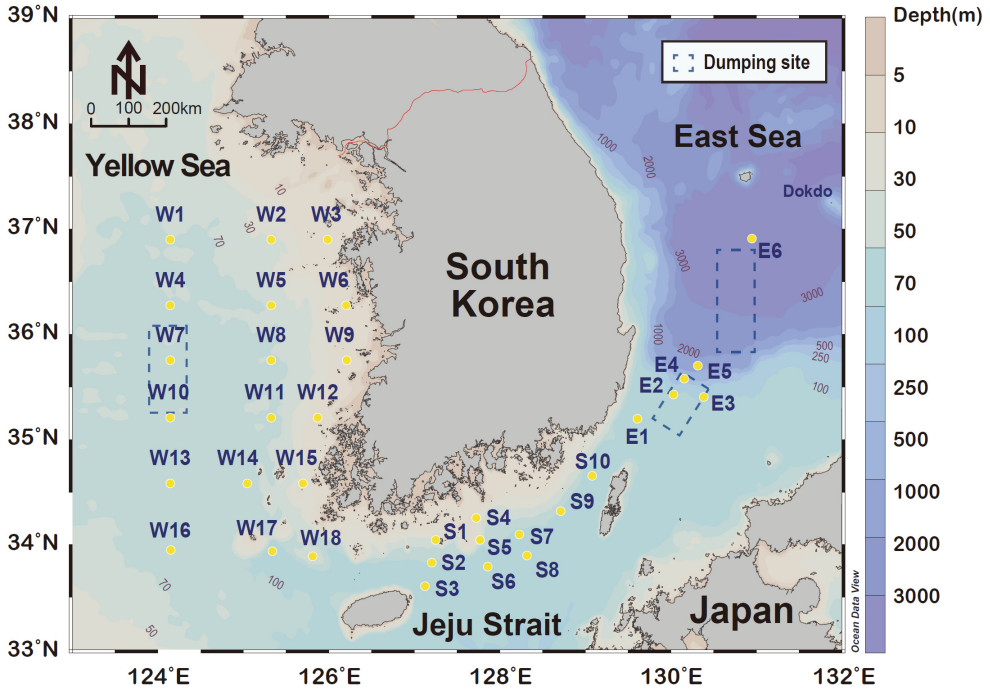


**Figure 1.** Map showing the sampling sites in the coastal and offshore areas of South Korea

순도 질소가스(99.999%)를 이용하여 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 수행되었으며, HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 $\mu$ m film) 컬럼을 이용하여 총 31개 PCBs 동족체를 분리 및 분석하였다. 오븐 승온 조건은 최초 60 ℃에서 1분간 유지하고 140 ℃까지 5 ℃/분으로 승온한 뒤 1분간 유지하였다. 이후 200 ℃까지 30 ℃/분으로 승온하여 1분간 유지하였고, 250 ℃까지 4 ℃/분으로 승온한 뒤 5분간 유지하였으며, 최종적으로 300 ℃까지 10 ℃/분으로 승온하고 1분간 유지하였다. SIM(selected ion monitoring) 모드로 분석하였으며, 분석에 이용되는 정량 및 정성 이온은 Table 1과 같다.

## 2.4 정도관리

속실렛 추출 과정 전 첨가한 내부 표준물질의 회수율 평가는 질량 표지된($^{13}$C labeled) 7개 화합물(CB 28, 52, 101, 153, 138, 180, 209)로 수행되었으며, 결과는 89−132% (평균 108%)의 범위였다. 방법 검출한계 계산을 위해 저농도 표준용액을 7회 반복 분석하였으며, 각 화합물별 검출한계는 0.012 (CB 70)−0.034 (CB 28) ng g$^{-1}$의 범위를 보였다.

## 2.5 통계분석

퇴적물 내 PCBs의 기원을 추정하기 위하여 SPSS 24.0(SPSS Inc., Chicago, IL)을 이용하여 통계분석을

**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 |

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 주성분분석(principle component analysis; PCA)을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 퇴적물 내 PCBs의 공간 분포 특성

서해, 남해 및 동해의 모든 표층 퇴적물 시료에서 PCBs가 검출되었다(Table 2, Fig. 2). 퇴적물 내 PCBs 농도 범위는 서해, 남해 및 동해에서 각각 0.10－1.3 ng $g^{-1}$ dry mass (dm), 0.10－1.1 ng $g^{-1}$ dm, 0.29－4.9 ng $g^{-1}$ dm 이었다. 각 해역의 평균 PCBs 농도는 서해에서 0.37 ng $g^{-1}$ dm, 남해에서 0.49 ng $g^{-1}$ dm, 동해에서 2.34 ng $g^{-1}$ dm으로 나타났으며, 상대적으로 동해 퇴적물에서 높은 PCBs 농도를 보였다. 전체 정점 중 E5 정점에서 4.87 ng $g^{-1}$ dm으로 가장 높은 농도가 검출되었고, 다음으로 E6 (3.1 ng $g^{-1}$ dm), E4 (2.8 ng $g^{-1}$ dm) 순이었다. 퇴적물 내 PCBs 농도는 입도 조성과 TOC에 의존적인 경향을 보이는 것으로 알려져 있다 (Huang et al., 2011). 본 연구지역 정점의 TOC 함량은 동해가 평균 2.34%로 서해 0.37%와 남해 0.87%에 비해 상대적으로 높은 수준을 보였다(Table 2). 전체 정점 중 PCBs 농도가 높았던 동해의 E4, E5, E6 정점에

**Table 2.** Overview of the sampling locations and properties of sediment samples collected from coastal and offshore areas of South Korea

| Site | Station | Latitude(N) | Longitude(E) | Depth(m) | Water contents(%) | Mud contents(%) | TOC (%) | ∑PCBs (ng $g^{-1}$ dm) | ∑PCBs (ng $g^{-1}$ OC) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Yellow Sea | W1 | 36°55.73' | 124°24.09' | 38 | 24.8 | 46.4 | 0.24 | 0.42 | 1.74 |
| (West Sea) | W2 | 36°55.29' | 125°12.38' | 52 | 27.9 | 5.9 | 0.13 | 0.24 | 1.78 |
| | W3 | 36°56.34' | 125°58.94' | 76 | 25.3 | 13.9 | 0.15 | 0.14 | 0.95 |
| | W4 | 36°20.28' | 124°23.44' | 16 | 23.1 | 10.9 | 0.17 | 0.31 | 1.85 |
| | W5 | 36°19.09' | 125°12.68' | 62 | 25.5 | 6.8 | 0.12 | 0.16 | 1.31 |
| | W6 | 36°33.00' | 126°24.00' | 76 | 52.7 | 84.7 | 0.82 | 0.51 | 0.62 |
| | W7 | 35°50.64' | 124°23.00' | 28 | 27.0 | 6.9 | 0.13 | 0.92 | 6.91 |
| | W8 | 35°51.16' | 125°12.23' | 73 | 26.9 | 15.8 | 0.21 | 0.32 | 1.52 |
| | W9 | 35°51.18' | 126°14.42' | 83 | 54.4 | 77.4 | 0.70 | 1.26 | 1.79 |
| | W10 | 35°19.93' | 124°23.87' | 31 | 56.1 | 97.5 | 0.75 | 0.41 | 0.55 |
| | W11 | 35°20.05' | 125°12.84' | 74 | 25.2 | 17.6 | 0.30 | 0.19 | 0.65 |
| | W12 | 35°19.61' | 125°46.97' | 85 | 50.1 | 69.5 | 0.50 | 0.19 | 0.37 |
| | W13 | 34°43.27' | 124°23.48' | 33 | 48.6 | 88.4 | 0.47 | 0.32 | 0.69 |
| | W14 | 34°43.25' | 125°00.27' | 93 | 32.9 | 40.9 | 0.23 | 0.29 | 1.30 |
| | W15 | 34'43.28' | 125°43.13' | 77 | 38.8 | 46.5 | 0.28 | 0.10 | 0.37 |
| | W16 | 34°06.67' | 124°24.30' | 69 | 40.8 | 96.5 | 0.52 | 0.24 | 0.47 |
| | W17 | 34°04.55' | 125°18.31' | 107 | 34.3 | 97.3 | 0.62 | 0.31 | 0.49 |
| | W18 | 34°01.28' | 125°42.23' | 80 | 43.3 | 60.7 | 0.34 | 0.31 | 0.93 |
| Jeju Strait | S1 | 34°09.00' | 127°06.00' | 32 | 28.0 | 11.4 | 0.80 | 0.37 | 0.44 |
| (South Sea) | S2 | 33°55.30' | 127°03.00' | 66 | 33.2 | 22.3 | 0.73 | 0.16 | 0.14 |
| | S3 | 33°42.00' | 127°00.00' | 111 | 28.4 | 20.2 | 0.49 | 0.21 | 1.29 |
| | S4 | 34°21.00' | 127°36.00' | 18 | 55.4 | 85.6 | 1.00 | 0.81 | 0.59 |
| | S5 | 34°09.00' | 127°39.00' | 38 | 56.1 | 87.9 | 1.05 | 1.12 | 0.77 |
| | S6 | 33°54.00' | 127°42.00' | 83 | 41.6 | 69.4 | 0.84 | 0.52 | 1.34 |
| | S7 | 34°12.00' | 128°06.00' | 73 | 51.1 | 70.6 | 1.43 | 0.63 | 0.36 |
| | S8 | 34°00.00' | 128°12.00' | 92 | 39.8 | 31.4 | 1.53 | 0.59 | 0.24 |
| | S9 | 34°18.00' | 128°36.00' | 94 | - | - | 0.22 | 0.35 | 0.74 |
| | S10 | 34°39.00' | 129°00.00' | 75 | 41.6 | 35.0 | 0.66 | 0.10 | 0.32 |
| East Sea | E1 | 35°26.26' | 129°28.78' | 70 | - | - | 1.88 | 1.22 | 0.65 |
| | E2 | 35°38.01' | 129°49.27' | 140 | - | - | 0.24 | 0.29 | 1.22 |
| | E3 | 35°43.16' | 129°54.08' | 605 | 71.8 | 93.0 | 3.12 | 1.85 | 0.59 |
| | E4 | 35°47.76' | 129°59.71' | 1089 | - | - | 3.23 | 2.76 | 0.86 |
| | E5 | 35°59.29' | 130°12.51' | 1410 | - | - | 2.70 | 4.87 | 1.80 |
| | E6 | 37°01.36' | 130°55.55' | 2000 | 72.5 | 90.0 | 2.90 | 3.05 | 1.05 |

- Not analyzed.

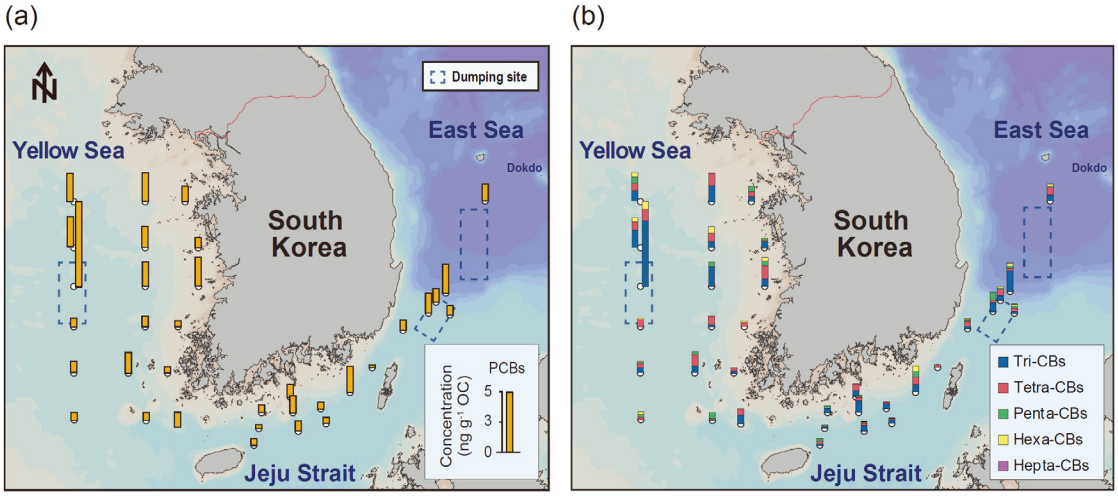


**Figure 2.** Spatial distributions of PCBs in surface sediments collected from the coastal and offshore areas of South Korea ((a) concentrations and (b) compositions)

서 다른 정점에 비해 높은 TOC 농도를 보였고, 이에 따라 동해지역의 PCBs 농도가 서해와 남해에 비해 높은 것으로 판단되었다.

건중량(dry mass basis)을 기반으로 한 PCBs 농도로 세 해역을 비교하는 것은 다양한 입도 분급에 따른 TOC의 불균질성에 의해 적절하지 않을 수 있다(Huang et al., 2011). TOC로 표준화하여 PCBs 농도를 산출하였을 때 서해, 남해 및 동해에서 각각 0.37−6.9 ng $g^{-1}$ OC (평균: 1.4 ng $g^{-1}$ OC), 0.16−1.6 ng $g^{-1}$ OC (평균: 0.62 ng $g^{-1}$ OC), 그리고 0.59−1.8 ng $g^{-1}$ OC (평균: 1.0 ng $g^{-1}$ OC)로 나타났다. 건중량으로 비교하였을 때와 대조적으로 서해에서 가장 높은 PCBs 농도를 보였다. 이는, 동해가 서해와 남해에 비해 니질 함량이 높고 유기탄소는 이와 비례하여 높아지는 특성이 있기 때문으로 보여진다(김 등, 2005).

건중량으로 높은 농도를 보였던 E4, E5, E6 정점의 유기탄소 표준화 된 농도는 각각 0.86 ng $g^{-1}$ OC, 1.8 ng $g^{-1}$ OC, 1.1 ng $g^{-1}$ OC로 나타났다. TOC 표준화된 농도로 보았을 때 서해의 W7 정점 (6.9 ng $g^{-1}$ OC)에서 가장 높은 농도를 보였다(Fig. 2a). 이전에 수행된 연구에서 W7 정점 인접 지역 퇴적물에서 주변 지역에 비해 상대적으로 높은 PCBs 농도가(5.85 ng $g^{-1}$ dm) 검출된 사례가 있었다(Zhang et al., 2007). 이 지역은 서해에 위치한 해양투기 지역으로 지난 수십 여 년간 육상에서 발생한 폐기물을 배출한 지역이다(Hong and Shin, 2009). 따라서 W7에서 높게 나타난 PCBs 농도는 폐기물의 영향을 받았을 것으로 추측된다.

전반적으로 이전에 국내에서 수행된 PCBs 연구와 비교하였을 때, 본 연구에서 나타난 퇴적물 내 PCBs 농도는 비슷하거나 상대적으로 낮은 수준이었다(Table 2). 또한, 본 연구에서 검출된 PCBs 농도는 미국의 국립해양대기국(NOAA)에서 제시한 퇴적물 기준인 ERL 22.7 ng $g^{-1}$ dm 및 ERM 189 ng $g^{-1}$ dm에 비해 매우 낮은 수준을 보였다. 따라서 본 연구지역은 퇴적물 내 PCBs로 인한 생태적 위해성이 크게 나타나지는 않을 것으로 판단된다.

### 3.2 국내 연안 지역과 비교

서해 표층 퇴적물 내 평균 PCBs 농도는 이전 서해 연안 및 만에서 보고되었던 1.51 ng $g^{-1}$ dm (Choi et al., 2014), 2.12 ng $g^{-1}$ dm (Hong et al., 2006)에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였지만, 아산만의 0.43 ng $g^{-1}$ dm (Choi et al., 2011)보다 높은 농도를 보였다(Table 3). 남해 표층 퇴적물 내 PCBs 평균 농도는 과거 남해 연안과 만에서 측정된 평균 농도인 12.30 ng $g^{-1}$ dm (Hong et al., 2006)와 진해만에서 측정된 2.84 ng $g^{-1}$ dm (Choi et al., 2001)보다는 낮았으나 여수만과 고현만에서 측정된 0.56, 0.49 ng $g^{-1}$ dm (Choi et al., 2011)와 유사한 농도를 보였다. 동해의 PCBs 평균 농도는 기존에 알려진 동해 연안의 9.18 ng $g^{-1}$ dm (Hong et al., 2006)보다 낮았다. 전반적으로 본 연구에서 나타난 서해, 남해 및 동해 퇴적물 내 PCBs 농도 수준은 국내 연안에 비해 낮은 수준을 보였다.

### 3.3 퇴적물 내 PCBs의 동족체 조성

서해 퇴적물 내 PCBs 동족체 분포는 Tetra-CBs가 39.0%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 다음으로 Tri-

**Table 3.** Comparison of sedimentary concentrations of PCBs in Korean coastal waters reported in the previous studies and this study

| Sampling regions | | Type | Sampling year | # of Site | Total PCBs (ng $g^{-1}$ dw) | | | References |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Min | Max | Mean | |
| Yellow Sea | Asan Bay | Bay | 2001-2003 | 1 | 1.9 | 3.3 | 2.3 | Choi et al., 2014 |
| (West Sea) | | | 2005 | 6 | | | 2.3 | Choi et al., 2011 |
| | | | 2006-2007 | 1 | | | 0.43 | Choi et al., 2011 |
| | Taean | Coastal | 2001-2003 | 1 | | | 1.4 | Choi et al., 2014 |
| | | | 2006-2007 | 2 | | | 0.20 | Choi et al., 2011 |
| | Saemangeum | Coastal | 2001-2003 | 3 | 1.2 | 1.8 | 1.5 | Choi et al., 2014 |
| | | | 2006-2007 | 1 | | | 0.01 | Choi et al., 2011 |
| | Youngsan R.E. | Estuary | 2006-2007 | 1 | | | 0.14 | Choi et al., 2011 |
| | West Coasts | Bay & coastal | 1997-2002 | 35 | 0.27 | 16 | 2.1 | Hong et al., 2006 |
| | | | 2001-2003 | 6 | 1.1 | 2.0 | 1.5 | Choi et al., 2014 |
| | | | 2006-2007 | 1 | 0.52 | 3.1 | 0.05 | Choi et al., 2011 |
| | West Sea | Coastal & offshore | 2017 | 18 | 0.10 | 1.3 | 0.37 | This study |
| Jeju Strait | Yeosu Bay | Bay | 2006-2007 | 23 | | | 0.56 | Choi et al., 2011 |
| (South Sea) | Gwangyang Bay | Bay | 2000 | 22 | 0.2 | 2.9 | 1.4 | Hong et al., 2005 |
| | | | 2001 | 98 | 0.50 | 4.5 | 0.41 | Koh et al., 2005 |
| | | | 2001 | 89 | 2.3 | 11 | 6.2 | Hong et al., 2004 |
| | | | 2006-2007 | 23 | | | 1.1 | Choi et al., 2011 |
| | Jinhae Bay | Bay | 2000 | 20 | 0.50 | 8.8 | 2.8 | Choi et al., 2001 |
| | | | 2006-2007 | 23 | 0.72 | 2.1 | 1.1 | Choi et al., 2011 |
| | | | 2007 | 22 | 0.64 | 18 | 3.5 | Shim et al., 2010 |
| | Gohyeon Bay | Bay | 2006-2007 | 23 | | | 0.49 | Choi et al., 2011 |
| | Busan Bay | Bay | 2000 | 22 | 5.7 | 200 | 58 | Hong et al., 2005 |
| | | | 2000 | 20 | 3.9 | 56 | 31 | Choi et al., 2001 |
| | | | 2006-2007 | 23 | 2.9 | 15 | 9.0 | Choi et al., 2011 |
| | South Sea | Bay & coastal | 1997-2002 | 18 | 0.14 | 200 | 12 | Hong et al., 2006 |
| | | Coastal & offshore | 2017 | 10 | 0.10 | 1.1 | 0.49 | This study |
| East Sea | Onsan Bay | Bay | 1999 | 10 | 0.50 | 7.8 | 3.8 | Choi et al., 2011 |
| | Ulsan Bay | Bay | 1999 | 4 | 0.50 | 77 | 18 | Khim et al., 2001 |
| | | | 2000 | 11 | 2.1 | 22 | 8.5 | Hong et al., 2005 |
| | | | 2000 | 6 | 1.2 | 140 | 31 | Choi et al., 2001 |
| | Yeongil Bay | Bay | 2000 | 9 | 0.60 | 73 | 15 | Hong et al., 2005 |
| | | | 2000 | 26 | 0.50 | 32 | 3.1 | Koh et al., 2006 |
| | | | 2000 | 5 | 0.11 | 11 | 4.9 | Choi et al., 2001 |
| | East Coast | Bay & coastal | 1997-2002 | 26 | 0.09 | 73 | 9.2 | Hong et al., 2006 |
| | | | 2006-2007 | 4 | 0.03 | 0.61 | 0.23 | Choi et al., 2011 |
| | | Coastal & offshore | 2018 | 6 | 0.29 | 4.9 | 2.3 | This study |

CBs (37.5%), Penta-CBs (13.2%), Hexa-CBs (10.2%) 순으로 나타났다(Fig. 2b). 남해의 PCBs 동족체 구성은 평균적으로 Tri-CBs가 45.7%로 가장 높은 비율을 보였으며, Tetra-CBs (33.7%), Penta-CBs (15.6%), Hexa-CBs (5.0%) 순으로 나타났다. 동해는 Tri-CBs가 39.2%로 가장 높았고, 그 뒤로 Tetra-CBs (33.4%), Penta-CB (15.8%), Hexa-CBs (10.1%), Hepta-CBs (1.6%)로 나타났다. 즉, 해역별로 PCBs 동족체의 조성은 약간씩 차이를 보였다. 전반적으로 모든 해역에서 저염소치환체(Tri-, Tetra-CBs)의 평균 비율이 70% 이상으로 높은 비중을 차지하고 있었다. Hepta-CBs는 동해 일부 정점에서만 검출되었다. 동해 일부 정점에서만 Hepta-CBs가 검출된 것은 주변 해양투기 지역에 영향을 받은 결과일 것으로 추측되었다(Song et al., 2015).

PCBs는 동족체 중 저염소치환체(Mono-, Di-, Tri-, Tetra-CBs)가 고염소치환체(Penta-, Hexa-, Hepta-, Octa-, Nona-, Deca-CBs)보다 강이나 대기를 통해 더 멀리까지 전달되는 특성을 보이는 것으로 알려져 있다(Beyer and Biziuk, 2009). 그리고, PCBs가 대기를 통해 유입된 경우에 저염소치환체의 비율이 고염소치환체의 비율에 비해 상대적 높은 비중을 차지하는 것으로 알려져 있다(김 등, 2005). Li and Duan (2015)은 황해 지역 퇴적물 내 유기오염물질의 주요 공급원은

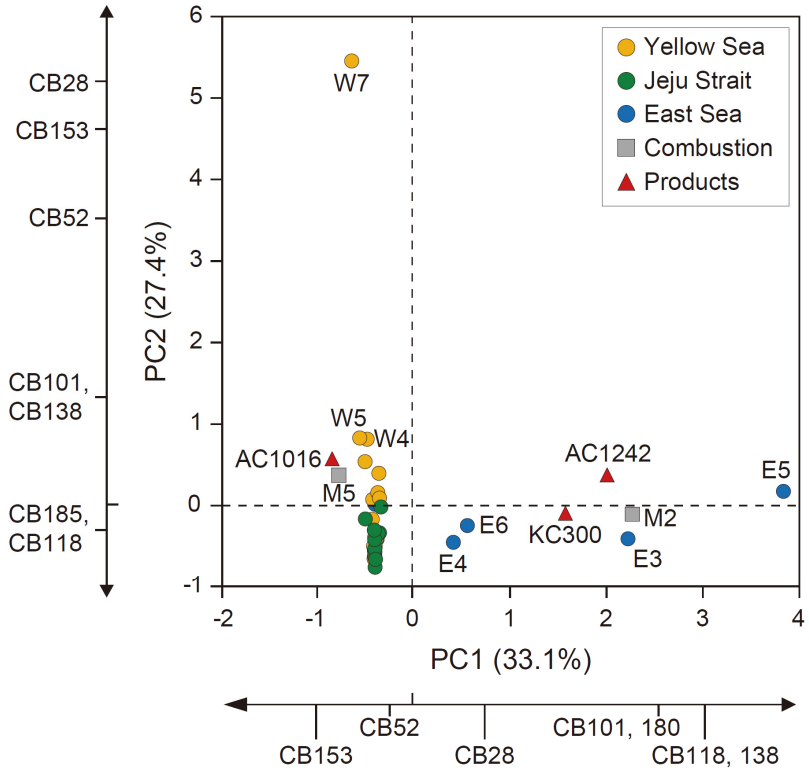


**Figure 3.** Result of principal component analysis (PCA) of individual PCBs in sediment samples collected from the coastal and offshore areas of South Korea and in representative sources (AC1016: Aroclors 1016; AC1242: Aroclors 1042; KC300: Kanechlor 300 (Pedersen et al., 2015); M2 and M5 (Ikonomou et al., 2002)).

대기의 미세먼지라고 주장한 바 있다. 본 연구에서 세 해역 모두 저염소치환체의 비중이 높은 것으로 보아 주로 대기를 통해 PCBs가 공급되었을 가능성이 있다. 하지만, 저염소치환체가 과거에 상업적으로 사용되었기 때문에 퇴적물에서 우세하게 나타날 수 있다는 보고도 있어(이와 김, 2002), 향후 더 자세한 기원 추적 연구가 필요하다.

이전 연구에 따르면, 한국 연안지역 중 고농도의 PCBs가 검출되는 산업지역 또는 항만 지역에서는 고염소치환체인 Penta-CBs, Hexa-CBs, Hepta-CBs, Octa-CBs가 퇴적물에서 주로 발견된다고 알려져 있다(Choi et al., 2011, 2014). 즉, 오염원으로부터의 거리가 가까울수록 고염소치환체가 우세하며 해양으로 유입된 고염소치환체의 PCBs는 높은 친지적 성질로 인해 재이동하지 못하고 연안 퇴적물에 축적되는 것으로 볼 수 있다. 반면, 저염소치환체는 상대적으로 이동성이 더 높아 외해역까지 이동할 수 있는 것으로 보인다. 서해의 경우 연안 정점에서 외해역 정점방향으로 저염소치환체인 Tri-CBs 평균 상대적 비율은 37.4%에서 60.1%로 높아지는 경향을 보였다. 반면에, Tetra-CBs와 Penta-CBs의 상대적 비율은 연안정점에서 각각 40.4%, 14.0%로 외해역 정점(각각 22.1%, 5.3%)에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 즉, 본 연구지역 퇴적물 내 PCBs의 조성은 오염원으로부터 멀어지면서 나타나는 자연적인 분별(fractionation) 현상을 그대로 반영하는 것으로 보인다. 오염의 경로 측면에서 보았을 때 서해와 남해, 동해 퇴적물 내 PCBs는 일부 해양투기해역 인접지역을 제외하고는 대기를 통한 유입(land-based)이 우세하게 나타나고 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 퇴적물 내 PCBs의 오염원 추정

PCBs의 오염원으로써 제품 기원으로는 변압기 절연유인 Aroclors 1016, Aroclors 1042, Kanechlor 300의 조성을 이용하여 비교하였다(Pedersen et al., 2015) (Fig. 3). 연소 기원으로는 Ikonomou et al. (2002)이 보고한 음식물 폐기물의 연소 시 생성되는 PCBs의 조성인 M2와 가연성 물질이 많이 함유된 물질을 연소하였을 때의 조성인 M5를 이용하여 사용하였다. 주성분

분석은 34개의 퇴적물 시료에서 31개의 PCBs 동족체 중 선정된 발생원의 조성과 부합하는 7개(CB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)를 골라 분석하였다. 주성분 분석 결과 주성분 1(PC1)이 총 변량의 33.1%, 주성분 2(PC2)는 27.4%로 전체의 60.5%를 설명할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 3). PC1에서는 CB 118, 138, 101, 180이 높은 상관성을 보였으며, PC2에서는 CB 28, 52, 153이 높은 상관성을 보였다.

본 연구의 서해, 남해 및 동해 표층 퇴적물 시료는 크게 2가지 그룹의 형태를 보였다. 동해 E3, E4, E5, E6 정점 퇴적물 시료는 PC1의 양의 방향에 위치하였고, 제품 기원 AC1242, KC300과 연소기원 M2와 동일한 그룹을 형성하였다. 이는 동해 퇴적물 시료 내 PCBs는 제품 및 폐기물의 연소로부터 기인했을 것임을 의미한다. 동해 일부 정점을 제외한 나머지 정점 퇴적물 시료는 모두 PC1의 음의 방향에 위치하였다. 그 중 서해 정점 퇴적물 일부 시료는 대부분 PC2의 양의 방향에 위치하였고, 남해 지역과 나머지 정점은 PC2의 음의 방향에 위치하였다. 이 지역 퇴적물들은 제품 AC1016과 연소기원 M5와 그룹을 형성하였고, 이는 서해와 남해 지역 퇴적물 내 PCBs는 제품기원과 가연성물질 연소로부터 기인했음을 의미한다.

서해의 폐기물 투기해역 정점 W7은 다른 정점들에 비해 PC2의 양의 방향에 많이 치우쳐있는데 이는 육상기원 폐기물의 영향을 받은 결과로 사료된다(Kim et al., 2009). 전반적으로 주성분 분석 결과 모든 해역의 퇴적물 내 PCBs는 제품 및 연소 기원이 혼합된 형태로 나타났으며, 동해와 서남해가 약간 구분되는 특성을 보였다. 하지만 PC1과 PC2의 설명력이 60.5%로 전체경향을 대변하기에는 부족하기 때문에 향후 더 자세한 오염원 추적 연구가 필요할 것이라 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 한국 서해, 남해 및 동해 표층 퇴적물 내 PCBs의 공간분포 특성과 잠재적 오염원에 대해 조사하였다. 높은 독성과 잔류성으로 인해 약 40여 년 전에 사용이 금지된 물질임에도 불구하고 여전히 PCBs는 외해역 퇴적물에서 검출되었다. 검출된 농도의 수준은 환경기준과 비교해 보았을 때 생태계에 악영향을 미칠 정도는 아니었지만 오염원 및 오염경로에 대한 연구는 향후 더 필요할 것으로 보인다. 특히, 최근 새로운 환경매체로 여겨지는 미세먼지 및 미세플라스틱은 PCBs와 같은 소수성 화학물질에 대한 흡착성이 높으며, 고염소치환체 PCBs를 더 먼거리까지 이동시킬 가능성이 있다. 한편, 고농도 PCBs가 함유된 육상 폐기물의 해양투기는 2016년 이후 완전히 금지되었으나 해양투기 인근해역의 퇴적물 오염은 아직까지 완전히 회복되지 않은 것으로 보인다. 국가해양기본도와 같은 우리나라 전체 해역을 대상으로 조사하는 사업에 해양 퇴적물 분석 항목을 추가하여 종합적인 해양 정보를 구축하고 해양영토의 효과적인 관리를 위한 토대를 구축하는 것이 중요하다.

## 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비로 지원되었습니다.

## 참고문헌

1. 김경수, 송병주, 박석운, 김종국, 2005. 공단지역 대기 중 PCBs의 오염농도 및 발생원 추정. 대학환경공학회지 27:385-389.
2. 김석구, 이미경, 안재환, 강성원 전상호, 2005. 퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 27: 923-931.
3. 이동훈, 김교근, 2002. 인천연안 퇴적물 중 PCB의 분포. Anal. Sci. Tech., 15(3):287-299.
4. 최성득, 백송이, 장윤석, 윤영준, 박병권, 홍성민, 2007. 남극 세종기지에서의 대기 중 PCB 모니터링. Ocean Polar Res. 29(4):297-302.
5. Beyer, A., Biziuk, M., 2009. Environmental fate and global distribution of polychlorinated biphenyls. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 201:137-158.
6. 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.
7. 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.
8. Choi, H.G., Moon, H.B., Choi, M., Yu, J., 2011. Monitoring of organic contaminants in sediments from the Korean coast: spatial distribution and temporal trends (2001–2007). Mar. Pollut. Bull.

62:1352-1361.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Hong, S.H., Yim, U.H., Shim, W.J., Oh, J.R., 2005. Congener-specific survey for polychlorinated biphenlys in sediments of industrialized bays in Korea: regional characteristics and pollution sources. Environ. Sci. Technol. 39:7380-7388.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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. Con. Tox. 40:141-150.
18. 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.
19. 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.
20. 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. Saf. 61:366-379.
21. Li, Y., Duan, X., 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of China Sea. Environ. Sci. Pollut. Res. 22:15432-15442.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Wania, F., Mackay, D., 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. Environ. Sci. Technol. 30(9):390A-396A.
26. 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.
27. 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.