

## 낙동강 하구 역 표층퇴적물의 강열감량 및 입도 특성과 다이옥신류 (PCDD/DF and dioxin like PCBs)의 비교 평가

박지현<sup>3</sup> · 정봉길<sup>2,3</sup> · 김철수<sup>2</sup> · 이석형<sup>2,3</sup> · 황성민<sup>2,3</sup> · 박노진<sup>2,3</sup> · 정유진<sup>1,3</sup> · 옥 곤<sup>1,2,3,†</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 환경대기학과, <sup>2</sup>부경대학교 대학원 지구환경공학과, <sup>3</sup>부경대학교 다이옥신연구센터

### A Comparative Assessment of Dioxins (PCDD/DFs and Dioxin-like PCBs) and Characteristics of Ignition Loss and Grain Size of Surface Sediments in Nakdong River Estuary, Korea

Ji Hyun Park<sup>3</sup>, Bong Gil Jung<sup>2,3</sup>, Chul Su Kim<sup>2</sup>, Seok Hyung Lee<sup>2,3</sup>, Sung Min Hwang<sup>2,3</sup>,  
No Jin Park<sup>2,3</sup>, Yu Jin Jung<sup>1,3</sup>, and Gon Ok<sup>1,2,3,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Environment Atmospheric Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea.

<sup>2</sup>Graduate School of Earth Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea.

<sup>3</sup>Dioxin Research Center, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea.

The surface sediment samples (0-5) were collected at 23 stations from Nakdong River estuary and the adjacent coastal areas of Korea in October 2001. The samples were analyzed for PCDD/DFs and dioxin-like polychlorinated biphenyls (DLPCBs) contents using high resolution gas chromatography coupled with high resolution mass spectrometer (HRGC/HRMS). Total concentrations of PCDD/DFs ranged from 3.3 to 1,800 pg/g dry weight. DLPCBs concentrations varied from 19 to 5,995 pg/g dry weight. The TEQ values for PCDD/DFs in all sediment samples were below the safety sediment value (20 pg-TEQ/g dry weight) and the chronic toxicity assessments were seemingly moderate. These levels in surface sediments were moderate and lower than earlier data reported from the Korean coastal areas and other countries. The PCDD/DFs, and DLPCBs levels of surface sediments sampled from estuary and offshore stations showed significantly higher values than those from open sea stations. The profiles of these toxic organic contaminants of sediments from the stations showed different patterns. In addition, the residue levels of sediments from open sea stations showed low concentrations of toxic organic contaminants due to the low ignition loss (IL) values and mud fraction of grain size. The phenomena suggests that IL and grain size are one of the important factors that governs toxic organic contaminants including PCDD/DFs; the contaminant used in this investigation.

**Key words:** PCDD/DFs, dioxin-like PCBs, ignition loss (IL), grain size, TEQ, profile

#### 1. 서 론

다이옥신 (Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins, PCDDs) 및 퓨란 (Polychlorinated dibenzofurans, PCDFs), 폴리염화비페닐 (Polychlorinated biphenyls, PCBs)과 같은 다이옥신류는 잔류성 유기오염물질(Persistent organic pollutants, POPs) 중의 하나이다. 이들 잔류성 유기오염물질들은 인류에게 직접적인 영향을 미치거나

미칠 수 있는 잠재성을 가지고 있으며, 지구적 규모의 오염의 경향을 가지는 것으로 지적되고 있다.<sup>1-3)</sup>

이 중 PCDD/DFs 및 PCBs의 주요 발생원은 쓰레기 소각시설 뿐 만 아니라, 하수 슬러지, 자동차 배기가스, 제철산업, 제지산업의 염소 표백과정, 1,3,5-trichloro-2-(4-nitrophenoxy) benzene (CNP)·펜타클로로페놀(Pentachlorophenol, PCP) 등의 유기염소화합물의 제조와 같은 각종 산업공정에서 생성되어 환경 중

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: gonok@pknu.ac.kr

으로 배출되는 것으로 지적되고 있다.<sup>4-8)</sup>

일반적인 환경오염물질들과는 다르게 특히, 다이옥신류는 비의도적으로 생성 배출되어, 생물 농축성을 가지며, 세포내의 수용체와 결합하여 생물에 다중, 다양한 독성을 일으키는 독성적인 특성과, 환경에서 장거리 이동성 등의 특성을 가진 비의도적인 잔류성 유기오염물질 (Unintentional Persistent organic pollutants, UPOPs)로서 전 지구 규모적인 오염형태의 문제를 가지고 있는 것으로 지적되고 있다.<sup>9-11)</sup>

해양 퇴적물의 경우는 다이옥신류와 같은 독성유기화학물질이 환경의 운명과정에서 중요 종착지로 평가되고 있다. 특히, 저서생물을 포함하여 수생 생태계를 보호하기 위해서는 퇴적물의 질을 평가하고 관리할 필요성이 있으며, 퇴적물의 질을 평가하고 관리하는 방법 중 가장 일반적인 접근 방법으로서 생물학적 또는 화학적 실험을 통해 퇴적물의 관리 기준 (Sediment quality criteria, SQC)을 수립하고 있다.<sup>12)</sup>

최근 환경 시료에서의 독성등가 평가는 통합독성의 중요성에 의해 독성 등가량 (Toxicity equivalent quantity, TEQ)을 산출하여 평가하는 경향이 있다. 담수와 연안 퇴적물의 질을 평가하기 위하여 TEQs에 의한 관리 기준치 수립 (Quality objectives)에 있어서 여러 가지 방법 중 환경시료 중에서 잔류량을 근거로 하는 TRB (Tissue residue-based) 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이 방법은 생물체가 조직 내에 수용 가능한 정도의 잔류량을 기준으로 퇴적물의 안전한 화학적 농도를 제시하는 것으로 하고 있다.<sup>13)</sup>

또한, 환경 중에서 PCDD/DFs의 거동에 대한 연구를 수행하여 평가함에 있어 다양한 환경 매체에 대해서 PCDD/DFs의 농도 및 패턴 즉, 분포 특성에 대한 조사는 전반적인 평가에서 가장 중요한 요소이다. 따라서, PCDD/DFs의 농도 및 분포 특성은 현재의 오염상태를 나타낼 뿐 만 아니라 이들의 축적 및 발생원 추정에도 중요한 자료로 사용되고 있다.<sup>14-21)</sup>

해양 퇴적물 중의 PCDD/DFs의 농도 분포 특성 및 발생원에 관한 연구로서는 발트만<sup>22)</sup>에서의 연구보고가

있으며, 또한, 발트해의 Order Rive 하구 퇴적물 중에서의 PCDD/DFs의 농도 수준과 pattern에 대한 연구 보고<sup>23)</sup> 등 이 있다. 그리고, 영국의 연안 하구의 퇴적물에서의 PCDD/DFs의 보고<sup>24)</sup> 및 대화제에 의한 영향으로 PCDD/DFs의 일본 고베 연안의 퇴적물에 미친 영향의 보고<sup>25)</sup>를 비롯하여 스페인 연안의 퇴적물 중에서의 연구가 보고<sup>26)</sup>되어 있다.

한국의 경우, Ok et al.(1999)<sup>17)</sup>에 의해 해양 퇴적물의 PCDD/DFs에 대한 연구보고 이후, Moon et al. (2000, 2001)<sup>19,20)</sup>에 의해 전국 연안 표층퇴적물과 일부 연안의 잔류량 및 기원에 관한 연구 등이 보고되어 있다.

본 연구를 수행한 낙동강 하구 및 그 주변 해역은 농경 및 도시의 복합적인 육상기원의 해양유입경로를 가지고 있으며, 부산만 및 진해만을 포함한 퇴적물이 남해안으로 유입되는 육수역의 주요 수렴지역 중의 하나이며, 연안 합류지역으로서 다이옥신류 등 잔류성 유기오염물질의 해양유입에 대한 특성의 평가 자료의 축적이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 낙동강 하구역과 인근 해역을 중심으로 한 연안의 표층 퇴적물에 대해 다이옥신류 (PCDD/DFs 및 dioxin-like PCBs; 이하 DLPCBs라 함)의 오염수준 및 profile을 통해 분포 특성을 파악하고, 퇴적물의 강열감량과 입도의 특성에 따라 다이옥신류의 잔존특성을 비교 평가하고자 하였다.

또한, 본 연구는 낙동강하구 및 주변 해역의 표층 퇴적물 중의 다이옥신류 잔존 특성을 평가함으로써 육수 기원으로부터 하구의 기수 역을 경유한 해양유입에 이르는 다이옥신류에 대한 오염관리의 기초자료를 확보하는데 목적을 두고 있다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시료채취

본 연구는 해양 환경 중 표층 퇴적물의 PCDD/DFs, 및 DLPCBs의 농도분포 특성을 조사하여 연안 저질

Table 1. Description of Sampling site in this study

Group	Site	Description
Estuary	A1 ~ A5	The mouth of Nakdong river estuary
Offshore	B1 ~ B3	Harbor
Coast-1	C1 ~ C10	Mud and sand composition in the geochemical component
Coast-2	D1 ~ D5	Mostly sand fraction (over 95%) in the grain size

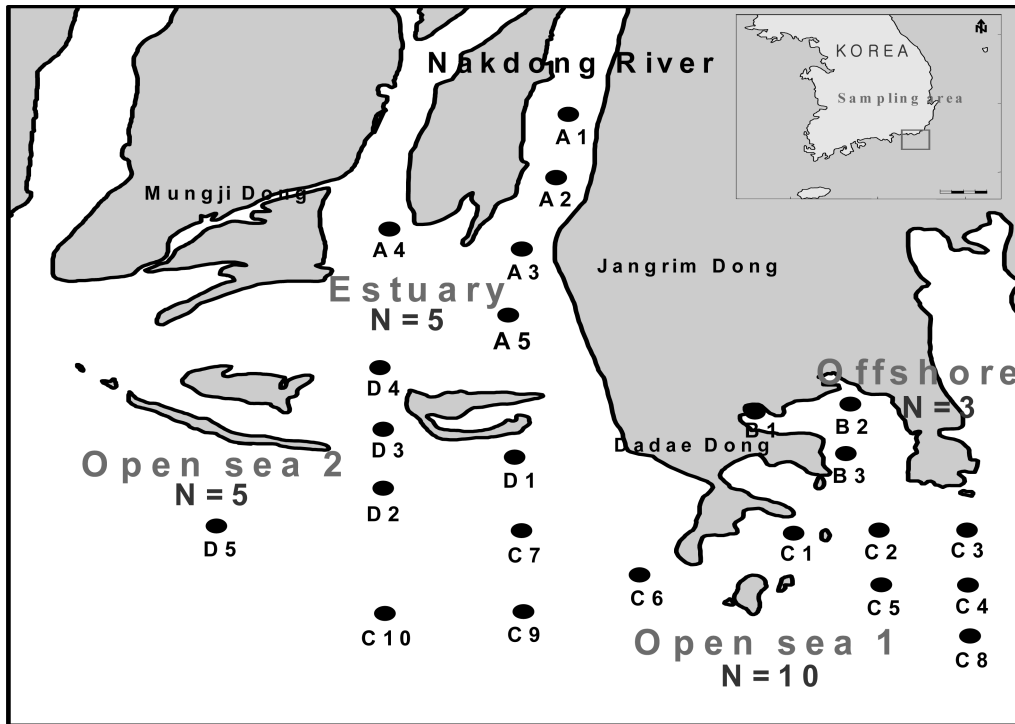


Fig. 1. Map showing the sampling stations from Nakdong River Estuary and the adjacent coastal areas of Korea. A, B, C and D indicate the characterization of sampling station.

환경의 독성 잠재성을 평가하기 위한 기초 연구로서 실시되었다. 본 연구의 시료 채취는 2001년 10월에 실시하였으며, 시료 채취 지점은 하천의 유입이 있는 낙동강 하구역과 선박의 출입이 잦은 인근 해역을 선정하였다. 지화학적이고 물리적인 특성을 고려하여 시료 채취 지점을 4 그룹으로 나누었으며, 총 23 지점에서 시료를 채취하였다. 본 연구의 시료 채취 지점을 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

## 2.2. 시료의 전처리

### 2.2.1. 추출

표층 퇴적물을 그랩 채니기 (Van-Veen grab sampler) 를 이용하여 총 23지점에서 채취하였다. 채취한 시료는 알루미늄 호일로 차광한 다음 폴리에틸렌 재질의 백으로 밀봉하여 실험실로 가져온 후 실온에서 자연 건조하였다. 건조된 시료는 돌맹이, 조개껍질 등의 조대물질을 제거한 후 막자사발과 2 mm 체를 이용하여 균질하게 하였다.

이 중 20 g을 분취하여 분석용 시료로 사용하였으며, 분취한 균질하게 한 표층 저질 시료 20 g은 속실텐 추출 장치를 이용하여 톨루엔 (Ultra residue analysis,

J.T. Baker) 200 mL로 16시간 동안 추출하였다. 추출된 시료는 40°C 수욕조에서 회전증발농축기를 이용하여 약 10 mL 될 때까지 농축하였다. 농축된 시료는 Keeping solvent로서 노르말-노난 (Ultra residue analysis, Fluka) 300  $\mu$ L를 첨가한 후 질소를 불어 넣어 톨루엔 냄새가 완전히 없어질 때까지 농축한 후 노르말-헥산 (Ultra residue analysis, J.T. Baker) 10 mL로 용매 전환하여 분석시료로 하였다.

### 2.2.2. 정제

PCDD/DFs 분석 시료 정제과정의 회수율을 확인하기 위하여 추출하여 분취한 시료용액에 내부표준물질 15종(EDF-8999, CIL Inc.)을 2  $\mu$ L를 주입하여 노르말-헥산으로 용량을 10 mL로 하였다. 정제방법은 다층 실리카겔 칼럼 크로마토그래피 (Multi-layer silica gel column chromatography: 70-230 mesh, 중성, Merck) 및 활성알루미나 칼럼에 의하여 정제하였다.<sup>17,22,27)</sup>

Dioxin-like PCBs의 경우, 내부표준물질 2종 (EC-4977, Wellington Inc.)을 3  $\mu$ L 주입한 후, PCDD/DFs 정제와 같은 방법으로 다층 실리카겔 칼럼 크로마토그래피를 사용하였으며 이 용출 액을 최종 농축하여

분석용 시료로 하였다. 본 연구에서의 PCDD/DFs 및 DLPCBs의 회수율은 평균 90% 이상을 나타내었다.

**2.3. 기기분석**

다이옥신류를 분석하기 위하여 HP-6890 고분해능 가스크로마토그래프 (High resolution gas chromatograph, HRGC)와 Jeol사의 JMS 700D 고분해능 질량 분석계 (High resolution mass spectroscopy, HRMS)를 사용하였으며, PCDD/DFs와 DLPCBs의 기기분석 조건은 기존에 보고한 동일한 분석조건에서 분석하였으며<sup>17,22)</sup> 다이옥신류의 각 동족체의 2개의 이온을 이용한 선택이온검출법 (Selected ion monitoring, SIM)에 의해 검출하였으며, 상대반응계수 (Relative response factor)를 구하여 정량하였다.

**2.4. 강열감량 및 입도 분석**

각 지점 퇴적물 시료에서의 강열감량 (Ignition loss, 이하, IL이라 칭함) 및 입도 (Grain size) 분석을 실시하였다. 강열감량 분석은 퇴적물을 고온으로 가열한 후 그 무게 차이를 이용하였다. 입도 분석은 63 μm를 기준체로 하여 습식 체질법, 건식 체질법으로 중량 %를 이용하여 니질과 사질로 구별하였다.<sup>28)</sup>

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 다이옥신류의 농도 수준**

퇴적물 중 동족체로서의 PCDD/DFs와 DLPCBs의 총 농도는 각각 3.3~1,800 pg/g d.w., 19~5,995 pg/g d.w의 범위를 나타내었으며, 평균 농도는 각각 401 pg/g d.w., 894 pg/g d.w.이었다. 4개의 그룹에서 채취한 표층 퇴적물에 대한 PCDD/DFs 동족체의 총 농도를 Fig. 2에 각각 나타내었다.

동족체로서의 PCDD/DFs의 총 평균 농도는 Offshore>Estuary>Open sea 1>Open sea 2 순으로 나타나며, 그 농도 수준은 각각 814, 772, 282, 7.5 pg/g d.w.이었다. 육상과 근접한 연안 구역의 Estuary와 Offshore은 비슷한 농도 수준이며, 이는 Open sea의 경우보다 2.7~108배 높은 농도였다. DLPCBs의 경우에도 Offshore>Estuary>Open sea 1>Open sea 2 순으로 나타났으며, 그 농도 수준은 각각 3,859, 895, 430, 39 pg/g d.w.이었으나, PCDD/DFs와는 달리 Offshore가 다른 Group과 비교하여 매우 높은 농도 수준으로 조사되었다. 이것은 다른 지역과는 달리 Offshore가 DLPCBs의 발생원 유입에 의한 영향을 많이 받고 있는 것으로 판단된다.

한편, 각 그룹의 지점별 DLPCBs의 총 농도 수준을

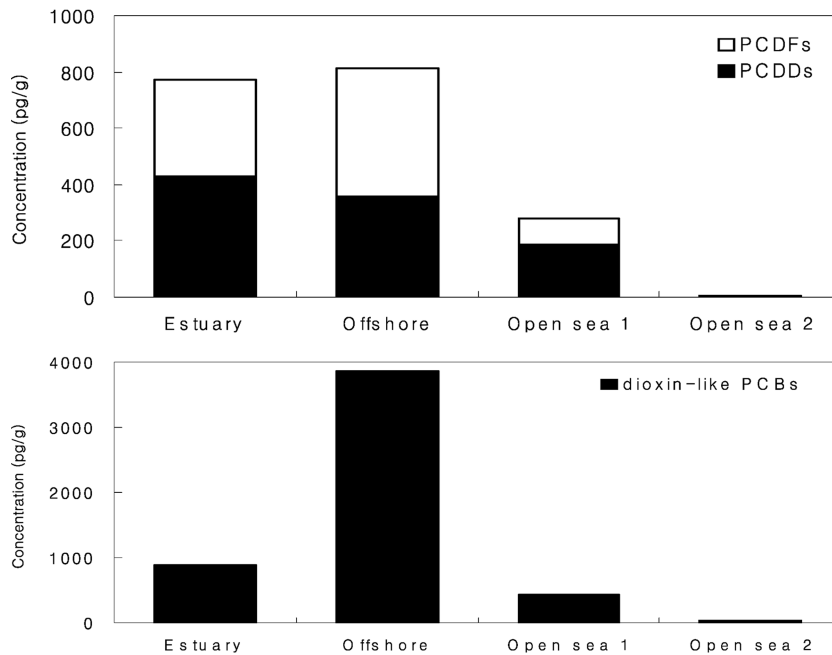


Fig. 2. Average of total concentration in sediments for each group.

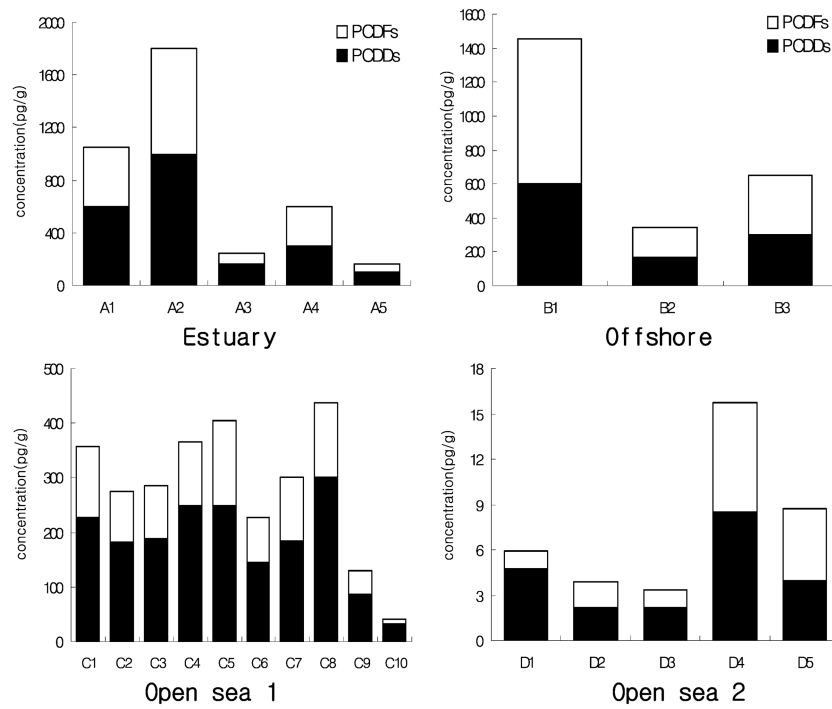


Fig. 3. The Total concentrations of PCDD/DFs in sediments from Nakdong River estuary and the adjacent coastal areas, Korea.

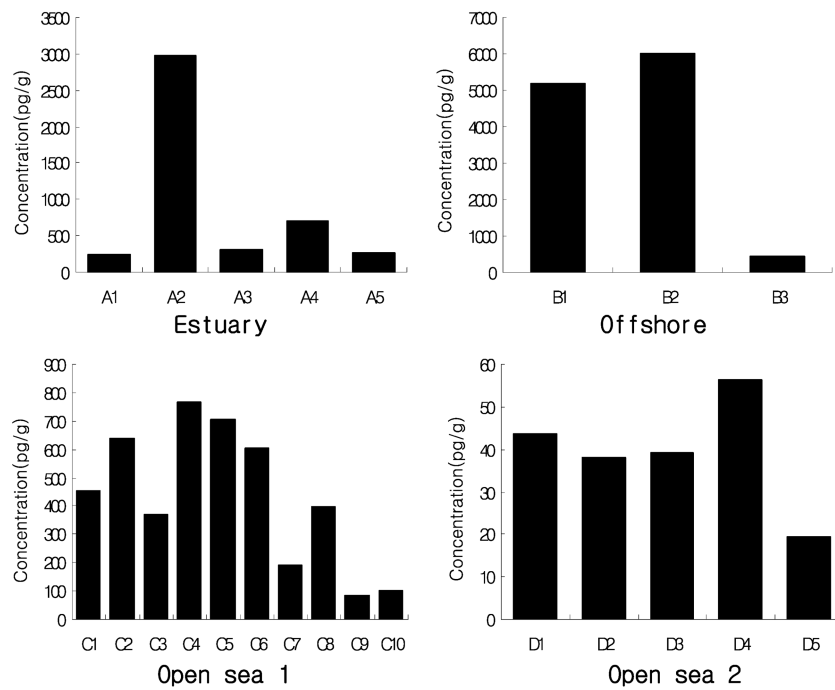


Fig. 4. The Total concentrations of dioxin-like PCBs in sediments from Nakdong River estuary and the adjacent coastal areas, Korea.

Fig. 3에 각각 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 4에서 알 수 있듯이 Estuary의 경우, A2 지점에서 PCDD/DFs와 DLPCBs가 각각 1,800 pg/g d.w., 2,971 pg/g d.w.으로 다른 지점과 비교하여 가장 높게 나타났다. 이 지점들의 경우 주위의 공업단지 및 하수처리장과 소형 선박의 출입 등 다른 측정 지점과 비교하여 배출 원으로부터의 영향을 많이 받고 있는 것으로 평가된다.

또한, Offshore의 경우, B1 지점에서 PCDD/DFs와 DLPCBs가 각각 1,450 pg/g d.w., 5,168 pg/g d.w.으로 다른 지점보다 높게 나타났다. 이는 선박의 정박 및 출입을 하는 큰 항으로 둘러싸여 만의 형식을 이루고 있어 해수의 유동이 적고, 주위의 상업시설로 인한 상업 및 생활하수의 직접적인 유입 영향을 받고 있는 것에 원인이 있는 것으로 평가된다.

본 연구결과에 대하여 퇴적물 농도 수준에 따른 카테고리화로 평가하고 있는 Holoubec et al. (1993)의 연구 결과<sup>29)</sup>와 비교해 보면, PCDD/DFs의 경우 Open sea 2 그룹의 D1~D5지점 (3.25~16.0 pg/g d.w.)은 배경농도 (< 200 pg/g d.w.)수준으로 판단할 수 있으며, 그 외 지역은 약간의 오염 우려 지역 (200~1,000 pg/g d.w.)로 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

각 그룹의 측정 지점별 PCDD/DFs와 DLPCBs의

WHO<sub>98</sub>-TEQ 농도 수준을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그룹 지점별 WHO<sub>98</sub>-TEQ 농도를 보면, 동쪽해의 총 농도 수준 경향과 매우 유사하게 나타났다. 이에 대하여 Estuary의 A2 지점과 Offshore의 B1 지점은 PCDD/DFs가 각각 20.4 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w.와 26.5 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w.의 농도 수준을 나타내었다.

이러한 농도 수준은 단지 PCDD/DFs 농도만으로도 유럽에서 제시하고 있는 안전한 퇴적물의 농도 (Safety sediment value)인 20 pg TEQ/g d.w.을 초과한 농도 수준을 나타내고 있는 것으로 밝혀졌다. 그리고, B2 지점에서도 역시 DLPCBs가 28.4 pg-TEQ/g d.w.의 농도 수준으로 20 pg-TEQ/g d.w.을 초과하는 결과를 나타내었다.

한편, Teiji et al. (2000)<sup>30)</sup>의 퇴적물에 대한 다이옥신류 (PCDD/DFs 및 DLPCBs)의 독성 등가 량에 따른 카테고리화로 평가하고 있는 연구 결과와 비교해 보면, Open sea 1과 2는 각각 0.31~3.8 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g, 0.04~0.27 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g로 배경농도 (0~4.9 pg-TEQ/g) 수준임을 알 수 있었다.

외국에서 조사된 PCDD/DFs의 농도수준과 본 연구에서 조사된 낙동강 하구 역 및 인근 해역의 퇴적물과

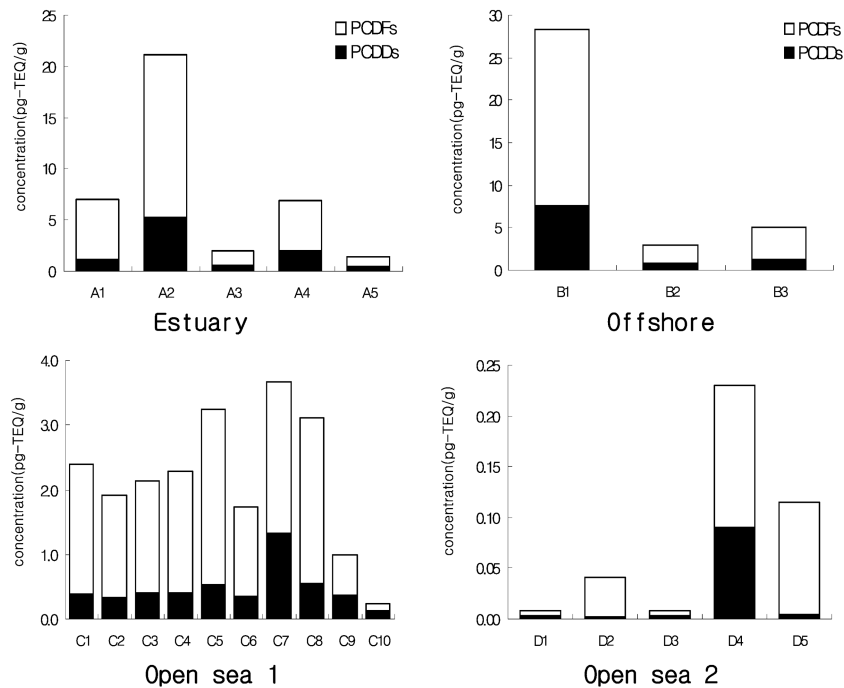


Fig. 5. The WHO<sub>98</sub>-TEQ concentrations of PCDD/DFs in sediments from Nakdong River estuary and the adjacent coastal areas, Korea.

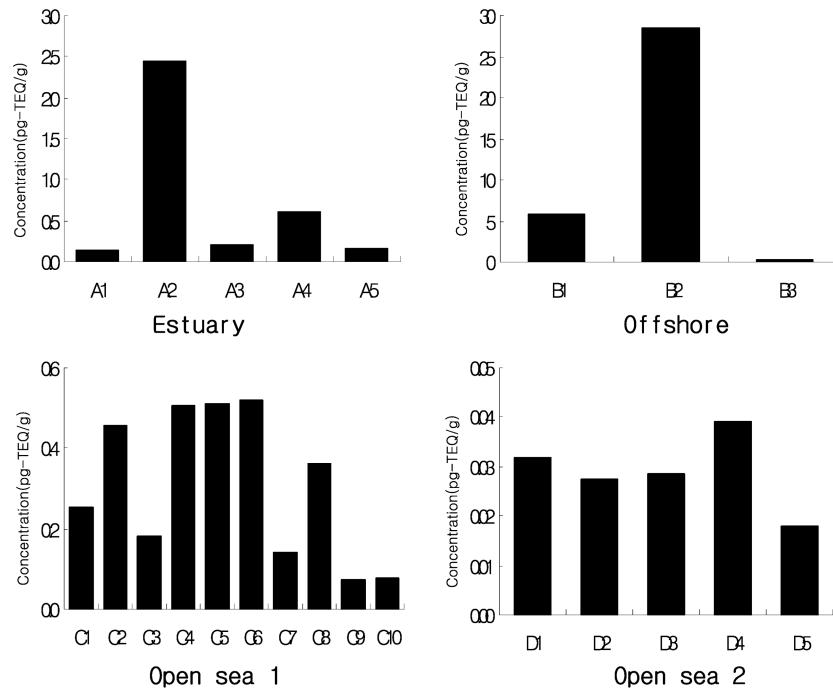


Fig. 6. The WHO<sub>98</sub>-TEQ concentrations of dioxin-like PCBs in sediments from Nakdong River estuary and the adjacent coastal areas, Korea.

비교해볼 때 Dannenberg et al. (1997)<sup>23)</sup>에 의해 조사된 Western Baltic해와 Oder 강의 농도와 비슷한 수준을 나타내었다.

### 3.2. 표층 퇴적물의 다이옥신류의 profile 특성

낙동강 하구와 인근 해역 표층 퇴적물 중 PCDD/DFs 및 DLPCBs의 분포 특성을 파악하기 위해서 PCDD/DFs의 동족체 및 2,3,7,8-치환 이성질체, DLPCBs의 이성체에 대한 프로파일을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 7~9에 나타내었다.

Estuary의 경우, 평균적으로 전체 농도 중 OCDD의 농도가 39%로서 가장 많은 분포를 보였으며, PCDDs가 전체 농도의 56%를 차지하는 것으로 나타났다. 2,3,7,8-치환 이성질체의 경우, 2,3,4,7,8,-PeCDF 농도가 전체 TEQ 농도 중 35%로서 가장 많은 분포를 보였으며, PCDDs 중에서는 1,2,3,7,8-PeCDD가 가장 많은 분포를 보이며, 그 외 PCDDs 이성체의 분포는 유사한 정도로 나타났다.

Offshore의 경우, OCDD의 농도가 20%, TeCDF의 농도가 18%로 가장 많은 분포를 보이며, 다음으로는 PeCDF, HxCDF로 각각 13%, 12%를 나타내었다. 한편, Estuary와는 달리, PCDFs의 분포가 전체의 56%

를 나타내며, PCDDs에서는 저염화에서 고염화로 갈수록 농도 분포가 증가하는 것으로 나타났다. 한편, PCDFs의 경우는 저염화에서 고염화로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, TEQ 농도 분포를 살펴보면 2,3,4,7,8,-PeCDF의 농도가 전체 TEQ 농도의 36%를 차지하고 있으며, Estuary와 유사한 패턴을 나타내었다.

Open sea 1와 2의 경우, OCDD의 농도가 각각 47%, 37%로 가장 많은 분포를 차지하고 있었으며, PCDDs가 전체 농도의 65%, 57%를 차지하고 있는 결과를 나타내었다. 이에 대하여 TEQ 농도 분포를 보면 2,3,4,7,8,-PeCDF의 농도가 전체 TEQ 농도 중 35%, 29%를 차지하는 것으로 동족체와 이성체 모두 Estuary와 유사한 패턴을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

본 연구 대상 지역인 낙동강 하구 역 및 인근 해역의 표층 퇴적물에 대한 PCDD/DFs의 분포 특성을 전체적으로 보면, Offshore (n=3)을 제외하고 나머지 3 Group (n=20)의 경우, OCDD가 전체 PCDD/DFs의 약 37~47%의 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. PCDDs 농도 분포는 저염화에서 고염화로 갈수록 약하게 증가하는 경향으로 대부분의 퇴적물 시료에서 유사

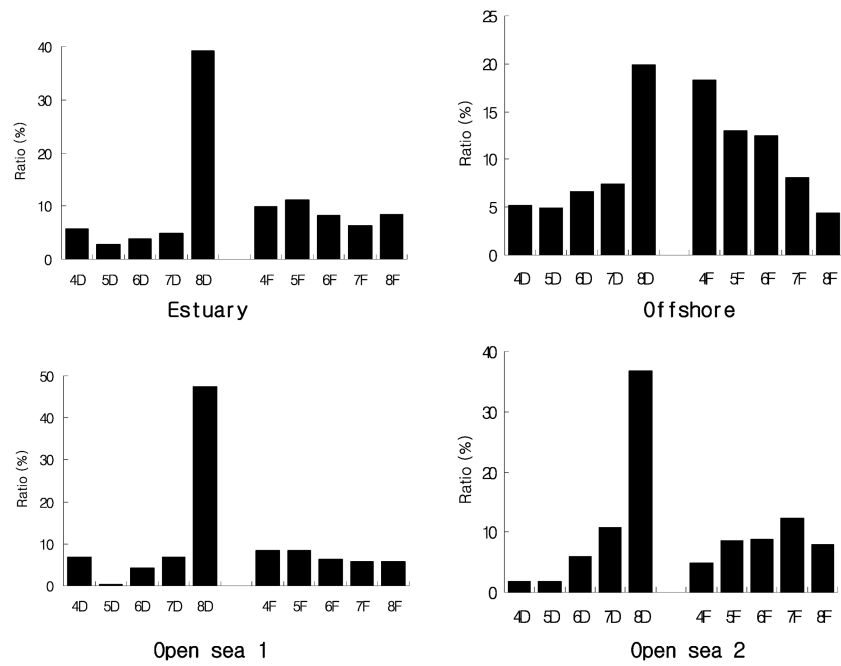


Fig. 7. Profile of homologue of PCDD/DFs in sediments for each group.

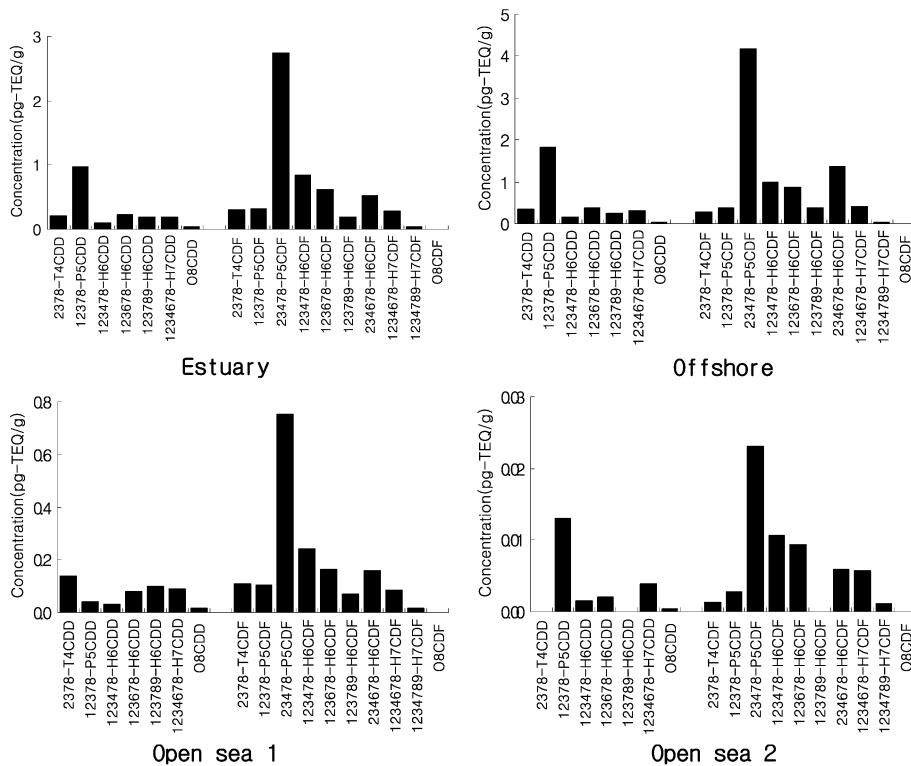


Fig. 8. Profile of 2,3,7,8-substituted isomer PCDD/DFs in sediments for each group.

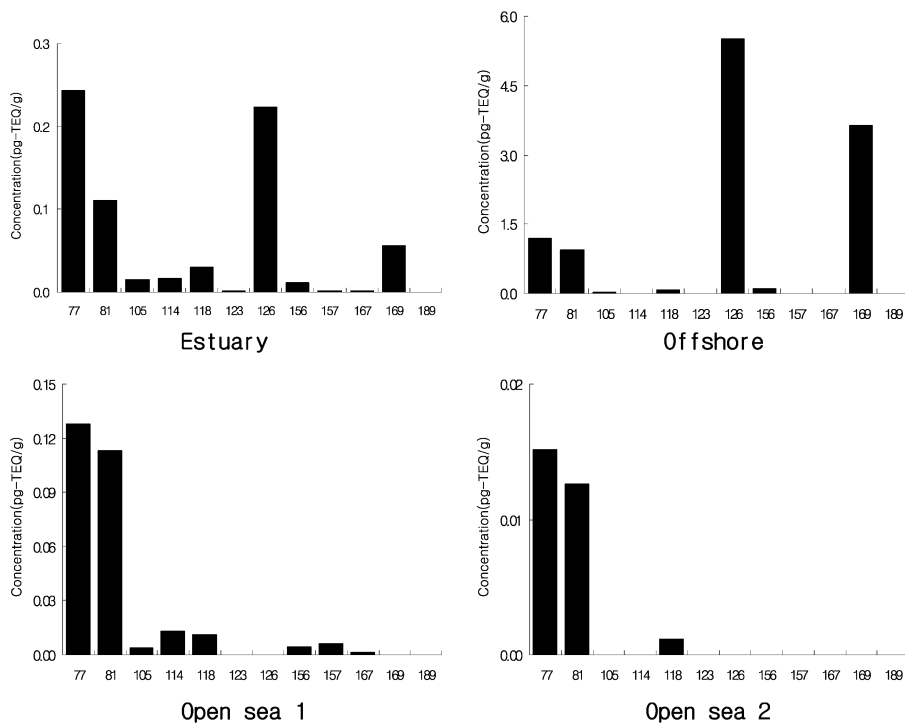


Fig. 9. Profile of toxic DLPCBs isomer in sediments for each group.

한 농도 분포 비를 나타내었다.

이러한 결과는 Ok et al. (1999)<sup>17)</sup>의 남해안 퇴적물, Moon et al. (2001)<sup>20)</sup>의 남동해안, Ohsaki et al. (1997)<sup>31)</sup>의 Fukuka River 및 Offshore의 퇴적물에서의 분포 특성과 일치하는 것으로 나타났으며, 이러한 특성의 결과는 PCP, CNP 등에 함유된 제조제의 살포에 의한 강물 경유의 유입과 소각 등 연소과정으로 배출되어 대기 침적과정을 통한 유입의 영향을 받고 있는 것으로 설명되고 있다.

한편, Offshore의 경우, PCDDs 농도 분포는 저염화에서 고염화로 갈수록 증가하고, PCDFs는 저염화에서 고염화로 갈수록 감소하는 경향을 나타낸다. TEQ 농도 분포는 2,3,4,7,8-PeCDF의 농도가 전체의 약 29~35%의 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났으며, 수계를 통한 경로뿐만이 아니라 대기경유의 고정발생원으로 부터의 영향에 대해서도 무시할 수 없는 것으로 사료된다.

DLPCBs의 TEQ 농도 경우, IUPAC No. 126인 3,3',4,4',5-PeCB가 Estuary와 Offshore에서 각각 32%, 48%로 높게 차지하는 반면에, Open sea 1과 2에서는 나타나지 않았다. Fig. 8에서 알 수 있듯이, Estuary와 Offshore의 패턴이 유사하게 나타났고, Open sea 1과

2가 유사한 패턴을 나타내었다. 이러한 결과는 Estuary와 Offshore 지점은 육상과 근접해 육지 발생원의 유입이 많은 것으로 판단되었으며, 수계를 통한 경우뿐만이 아니라 지표토양 경유 및 발생원에 대한 직접적인 영향을 받는 것으로 사료된다.

### 3.3. 퇴적물의 강열감량 및 입도와 다이옥신류 농도의 상관성

Open sea 2는 퇴적물 내의 IL이 1.6~2.5%로 나타났으며, 95% 이상이 사질로 이루어져 있는 반면에, Open sea 1은 IL이 3.2~10.5%를 나타내었으며, 니질과 사질을 함께 구성하고 있는 결과를 나타내었다.

Open sea 1과 2에 대한 퇴적물의 다이옥신류의 농도와 IL과의 상관관계 및 입도 조성에 대한 상관관계를 Fig. 10과 11에 나타내었다.

이와 같이, 주 오염원인 육상기인 오염원과 다소 멀리 떨어진 Open sea의 경우, 환경적 여건이 유사한 Open sea 입에도 불구하고 Open sea 1과 2에서 나타나는 농도차이는 시료의 입도 조성이 다르기 때문이라 판단된다. 또한, 1이 2와 비교해 PCDD/DFs 및 DLPCBs가 높은 농도 수준을 나타내는 것은 퇴적물 내의 IL ( $R^2=0.75, 0.89$ )과 입도 조성( $R^2=0.82, 0.77$ )

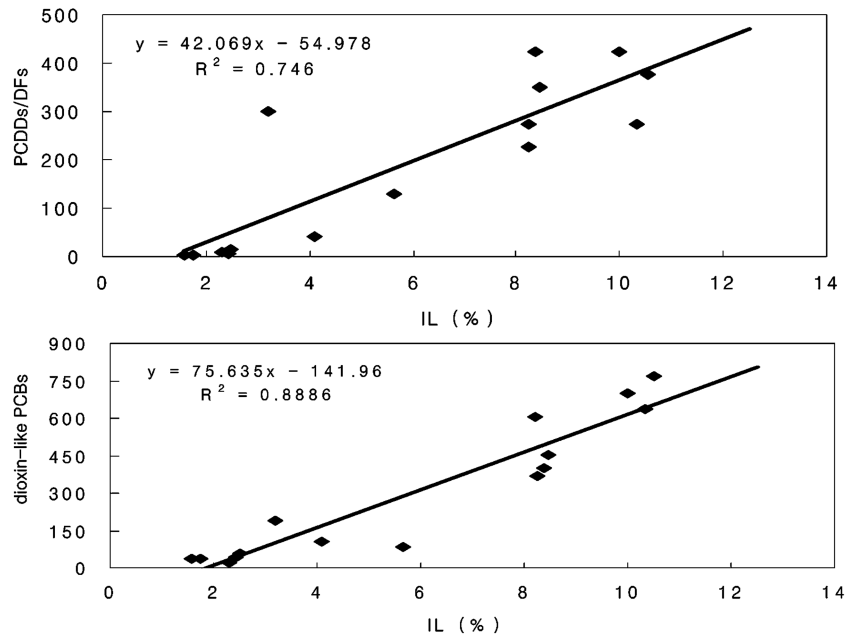


Fig. 10. Plot of total dioxins concentration (pg/g d.w.) versus IL (%) for Open sea samples (included Open sea 1, 2, n=15).

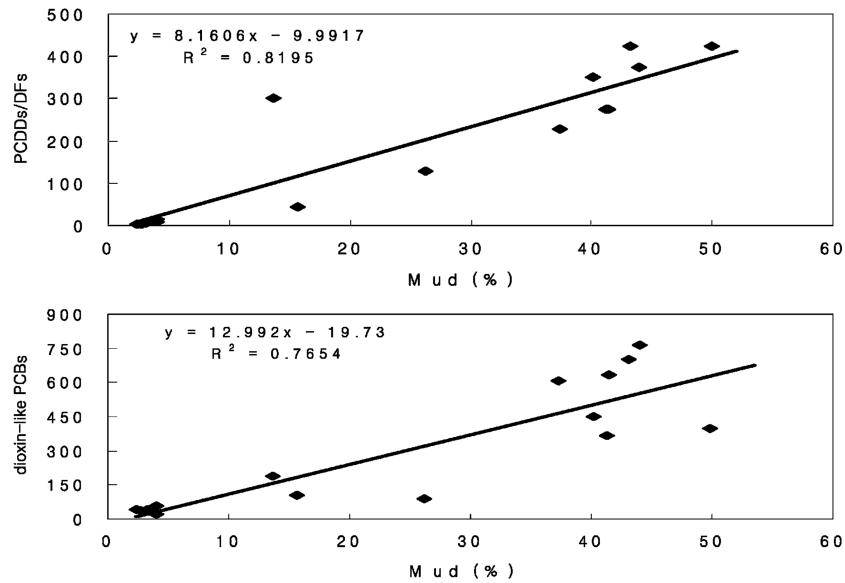


Fig. 11. Plot of total dioxins concentration (pg/g d.w.) versus Mud (%) for Open sea samples (included Open sea 1, 2, n=15).

의 차이에 따라 나타난 결과로 판단된다.

4개의 그룹에서 채취한 하구연안의 퇴적물 중 17종의 독성 등가의 PCDD/DFs와 12종의 독성 등가 DLPCBs의 독성등가의 WHO<sub>98</sub>-TEQ 농도는 0.01~28 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w., 0.02~28 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w의 범위를 나타내었으며, 평균 농도는 각각 4.2 pg

WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w., 1.8 pg WHO<sub>98</sub>-TEQ/g d.w로 Total 농도와 유사한 농도 경향성을 나타내어 다이옥신류의 농도는 퇴적물의 유기물 함량과의 상관성이 높은 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 낙동강 하구역과 그 주변 해역의 표층 퇴적물 중 다이옥신류 (PCDD/DFs 및 DLPCBs)의 농도수준을 파악하고, 하구 역 퇴적물의 유기물 함유에 따른 강열감량 및 입도 구성과의 상관성을 파악하였다. 또한, 그에 대한 다이옥신류의 분포 특성 프로파일을 검토하여 현황 특성을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 본 연구의 모든 표층 퇴적물 중 다이옥신류의 총 농도와 TEQ 농도는 각각 28~6,618 pg/g d.w., 0.04~34 pg-TEQ/g d.w.의 범위를 나타내었으며, 평균 농도는 각각 1,295 pg/g d.w., 6 pg-TEQ/g d.w.으로 나타났다으며, 외국의 경우와 비교하여 다소 낮은 농도 수준으로 확인되었다.

- 낙동강 하구 역 및 주변 해역의 표층 퇴적물에 대한 PCDD/DFs의 profile 패턴을 조사한 결과, 전체적으로 소각 등 연소 과정을 통하여 배출된 패턴들과 유사한 것으로 나타났다. 이는 대기 경유의 대기 침적과 논, 밭을 비롯한 토양 등에 살포된 제초제 및 노천의 소각 등의 잔존물이 토양유출과정의 runoff에 의하여 강물을 통한 유입의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

- 퇴적물 중 다이옥신류 농도 분포는 감열감량 (IL) 및 입도 분포와 높은 양의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 IL과 입도 분포가 퇴적물에 대한 유기 오염물질의 저장 능력을 결정 짓는 중요한 인자로서 작용하는 것으로 나타났다.

- 본 연구 대상 표층 퇴적물에 대한 WHO<sub>98</sub>-TEQ<sub>PCDD/DFs</sub>는 0.04~34 pg/g d.w.의 범위로 내만의 3지점을 제외하면 안전한 퇴적물의 농도 (Safe sediment value)로 제시되고 있는 20 pg TEQ/g d.w. 이하의 농도 수준이다. 하지만, 하구역의 생태환경의 관리를 위한 퇴적물의 안전성 평가는 PCDD/DFs 뿐 만 아니라 DLPCBs를 비롯하여 Polyaromatic Organic Mater (POM)를 포함한 유해성 유기오염물질에 대한 통합 독성평가의 필요성이 요구되었다.

- 따라서, 하구 역 퇴적물의 성상특성 분류를 통한 저장, 이동 및 생물농축에 대한 잠재능력 지수를 구축할 수 있는 자료의 축적과 화학물질의 통합독성의 총체적 평가 기반을 확보해 나갈 필요가 있는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양수산부 수산과학원의 내분비장애물질 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. J. S. Khim, K. Kannan, D.L. Villeneuve, C.H. Koh and J.P. Giesy, *Environ. Sci. Technol.*, **1999**, 33, 4199-4205.
2. K. Breivik., R. Alcock., Y-F. Li., R. E. Bailey., H. Fiedler and J. M. Pacyna., *Environmental Pollution*, **2004**, 128, 3-6.
3. UNEP, Global Report, **2003**, *Regionally based assessment of persistent toxic substances*.
4. A. L. Young., H K. Kang and B. M. Shepard, *Environ. Sci. Technol.*, **1983**, 17, 530-540.
5. J. Singh, W. Miles and J. P. Barrette, *Anal. Chem.*, **1985**, 68, 583-585.
6. S. Asada, H. Matsusita, M. Morita and Y. Hamada, *Chemosphere*, **1987**, 16, 1907-1917.
7. M. Hirokawa, N. Takeda and S. Najima, *Chemosphere*, **1990**, 20, 1575-1580.
8. H. Feidler, *Chemosphere*, **1996**, 32, 55-64.
9. W. Roger and L. Hang, *Environ. Sci. Technol.*, **1994**, 28, 965-972.
10. J. Willis, *Organohalogen Compounds*, **2000**, 32, 397-400.
11. M. C. Kennicutt., B. J. Presley, A. G. Requejo, J. M. Brooks and G. J. Denoux, *Environ. Sci. Technol.*, **1994**, 28, 1-15.
12. W. J. Adams., R. A. Kimerle and J. W. Barnett, *Environ. Sci. Technol.*, **1992**, 26, 1864-1875.
13. T. J. Iannuzzi, N. L. Bonnevie and R. J. Wenning, *Archives of Environ. Contami. and Toxicology.*, **1995**, 3, 366-377.
14. N. Seike, J. Hasegawa, M. Nishimori, M. Matsumoto, G. Takahashi, N. Sawamoto, M. Matsuda, M. Kawano and T. Wakimoto, *Organohalogen Compounds*, **2001**, 51, 92-95.
15. G. Ok., H. B. Moon., S. H. Ji and Y. H. Han., *Organohalogen Compounds*, **1999**, 43, 209-212.
16. G. Ok., S. H. Ji., H. B. Moon and Y. H. Han., *Organohalogen Compounds*, **1999**, 43, 213-216.
17. G. Ok., S. H. Ji., H. B. Moon., Y. S. Kim and H. S. Yang., *Organohalogen Compounds*, **1999**, 43, 393-396.
18. G. Ok., H. B. Moon., S. H. Ji and Y. H. Han., *Organohalogen Compounds*, **1999**, 44, 307-310.
19. H. B. Moon., H.G. Choi, S.S. Kim, P.J. Kim, P.Y. Lee and G. Ok, *Organohalogen Compounds*, **2000**, 46, 423-

- 426.
20. H. B. Moon., H.G. Choi, S.S. Kim, S.R. Jeong and P.Y. Lee, *J. Kor. Fish. Sci. Technol.*, **2001**, 4, 51-57.
  21. G. Ok., S. H. Ji., S. J. Kim., Y. K. Kim., J. H. Park., Y. S. Kim and Y. H. Han, *Chemosphere*, **2002**, 46, 1351-1357.
  22. L. O. Kjeller and C. Rappe, *Environ. Sci. Technol.*, **1995**, 29, 346-355.
  23. D. Dannenberge., R. Andersson and C. Rappe., *Marine Pollution Bulletin*, **1997**, 34, 12, 1016-1024.
  24. A. O. Tyler., G. E. Millward., P. H. Jones and A. Turner., Estuarine, *Costal and Shelf Science*, 1994, 39-1-13.
  25. S. I. Sakai., S. Deguchi., H. Takatsuki and A. Uchibo., *Chemosphere*, **2001**, 43, 537-547.
  26. E. Eljarrata., Agustina De La Cala., D. Larrazabalb., B. a Fabrellasb., A. R.. Fernandez-Albac., F. Borrulld., R. M. Marced and D. Barcelo., *Environmental Pollution*, **2005**, 136, 493-501.
  27. H. Miyata., O. Aozasa, Y. Mase, S. Ohta, S. Khono and S. Asada, *Chemosphere*, **1994**, 29, 9-11.
  28. 해양수산부, 해양환경공정시험방법, **2002**.
  29. I. Holoubek., A. Kocan, J. Chovancova, J. Petrik, J. Caslavsky, J. Helesic, K. Staffova, J. Kohoutek and L. Matlova, *Organohalogen Compounds*, **1993**, 12, 301-304.
  30. T. Teiji., A. Shinnichi, K. Masatoshi and M. Masatoahi, *Organohalogen Compounds*, **2000**, 46, 475-478.
  31. Y. Ohsiki., T. Matsueda and Y. Kurokawa, *Environmental Pollution.*, **1997** 96, 79-88.