

광양만내 지속성유기염소계화합물의 잔류농도 및 분포특성

홍상희* · 임운혁 · 심원준 · 오재룡

한국해양연구원 남해연구소

Environmental Occurrence of Persistent Organochlorines in Gwangyang Bay

Sang Hee Hong*, Un Hyuk Yim, Won Joon Shim and Jae Ryong Oh

Environmental Science Laboratory, South Sea Institute, KORDI, 656-830, Korea

Abstract - Persistent organochlorine compounds (OCs) were determined in sediments and bivalves from Gwangyang Bay. The concentrations of Σ PCB, Σ DDT, Σ HCH and Σ CHL in sediments were in the range of 2.25~11.4 ng g⁻¹, 0.16~1.16 ng g⁻¹, nd~0.51 ng g⁻¹, and 0.05~0.79 ng g⁻¹, respectively. The overall OCs concentrations in sediments were below the effect range-median (ER-M) values for benthic organisms suggested by NOAA (1991). Levels of PCB compounds are relatively lower than other industrialized bays (Pusan Bay, Ulsan Bay, and Youngil Bay). OCs accumulated in bivalves were higher than those in sediments. In bivalves, the concentration ranges of Σ PCB, Σ DDT, Σ HCH and Σ CHL were 9.97~31.7 ng g⁻¹, 7.54~22.6 ng g⁻¹, 0.49~2.0 ng g⁻¹, and 0.82~7.32 ng g⁻¹, respectively. Relatively high PCB concentrations in both environmental matrices are found at the inner bay than the outer part, indicating that the sources of PCBs were located inside the bay. DDT compound showed relatively high concentrations in the vicinity of the mouth of river and urban area, whereas other organochlorine pesticides show homogeneous distributions over the bay. Homologue profile of PCB compounds shows that low-chlorinated congeners (especially, di-, tri- and tetra-) are abundant in Gwangyang Bay, which is different from other areas in Korea.

Key words : PCBs, organochlorine pesticides, sediment, bivalve, compositional pattern

서 론

PCBs (Polychlorinated biphenyl), DDTs, CHLs (클로르단 화합물), HCHs (헥사클로르시클로헥산) 등을 포함하는 유기염소계 화합물은 합성 화합물로서 환경내 잔류성이 크고 생물독성이 강한 대표적인 환경오염물질이다. 다수의

유기염소계 화합물이 UN-ECE와 UNEP 등의 국제기구에서 배출 감소 및 규제를 위한 우선적 오염물질로 규정되고 있다(UN-ECE 1998; UNEP 1999). UN-ECE와 UNEP는 각각 16개, 12개 화합물을 지속성유기오염물질로 지정하고 있으며, 이중 10개 화합물을 본 연구에서 분석하였다.

유기염소계 화합물은 안정된 물리·화학적 성질을 가지고 있어 환경중에 유입되면 장기간 잔류하게 된다. 또한 대부분의 지속성 유기염소계 화합물은 난분해성과 준휘발

*Corresponding author: Sang Hee Hong, Tel. 055-639-8674, Fax. 055-639-8689, E-mail. shhong@kordi.re.kr

적 성향을 함께 지니고 있어 상당량이 대기를 통해 넓은 지역으로 확산 이동한다. 그 결과로서 이들 화합물이 사용된 바 없는 극지방 및 대양의 다양한 매질에서 검출되고 있다(Iwata *et al.* 1993; Muir *et al.* 1995; Allen-Gil *et al.* 1997; Hargrave *et al.* 2000; Montone *et al.* 2001). 유기염소계화합물의 배출은 산업공정, 생산물의 사용과정 및 폐기과정, 연료의 소각, 폐기물 등과 관련되며 (Ashley and Baker 1999; Walker *et al.* 1999), 직접적인 누출, 생활하수, 공업폐수, 대기로 부터의 침강 등의 다양한 경로를 통하여 해양생태계로 유입된다. 옥타놀-물 분배계수 (K_{ow})가 높은 대부분의 유기염소계화합물은 수계에서 빠르게 유기물질(생물 및 유기입자)로 분배된다. 유기염소계화합물을 흡착한 입자성물질은 해저층으로 침강하여 퇴적되며 저서생물에 의해 이용된다(Strandberg *et al.* 2000). 생물체내에 축적된 유기염소계화합물은 먹이사슬의 하위단계에서 상위단계로 전이되며, 이들 화합물의 난분해적 성향은 먹이사슬을 따라 이동하면서 축적농도의 확대를 가져온다(Borgå *et al.* 2001). 최근 이들 화합물은 생물의 내분비계를 교란하는 내분비교란물질로 구분되어 연구되고 있다.

광양만의 주위는 대단위 공단 및 산업시설이 밀집해 있으며, 산업활동을 지원하기 위한 항만이 발달해 있다. 공업단지과 선박활동은 광양만내 유기염소계화합물의 주요 오염원이 될 수 있다. 또한 광양만 동쪽의 남해도와 섬진강을 따라 위치한 농경지로부터의 농약류의 유입이 예상되며 인근도시로부터 도시하수의 유입 역시 예상된다. 본 연구에서는 전세계적으로 환경오염연구에 광범위하게 사용되고 있는 이매패류(굴과 홍합) 및 표층 퇴적물을 분석하여 광양만내 유기염소계화합물의 잔류현황 및 분포특성을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시료채취

표층퇴적물은 2001년 6월에 23개 정점에서 채집되었다(Fig. 1). van Veen grab을 이용하여 퇴적물을 채취한 후 미리 세척된 스테인리스 스푼을 이용하여 표층 2cm의 퇴적물을 취하여 세척된 유리용기에 담았다.

생물시료는 2001년 9월과 11월에 총 12개 정점에서 채집되었다(Fig. 1). 자연암반 및 부이에 서식하는 자연산 굴과 홍합을 대상생물로 하였으며, 암반에 서식하는 개체의 경우 간조시에 채집하였다. 채집된 시료는 현장에서 패각에 붙은 이물질을 제거하였으며 정점 당 30개체 이상을 분석에 이용하였다.

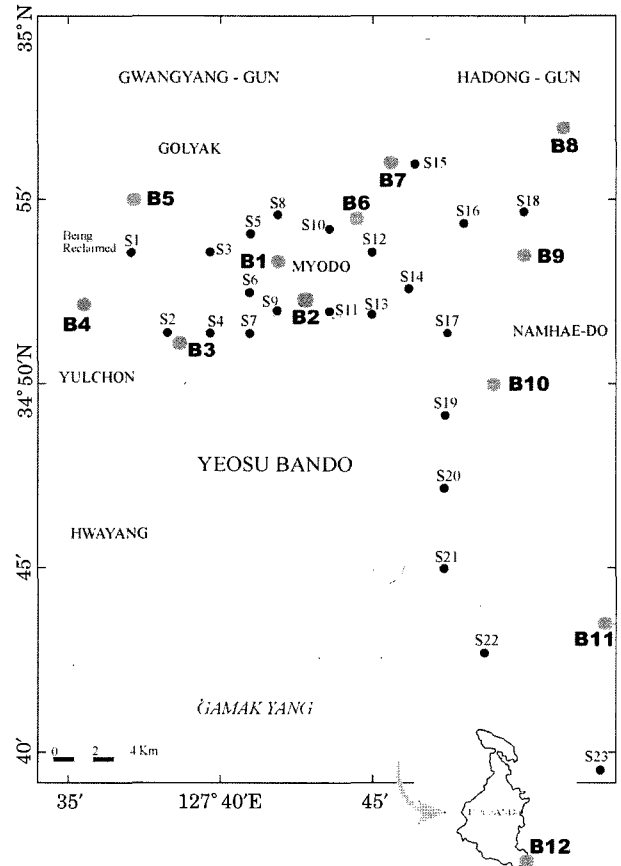


Fig. 1. Sampling locations of surface sediments (S1-S23) and bivalves (B1-B12) in Gwangyang Bay.

채집된 퇴적물 및 생물시료는 현장에서 드라이아이스에 냉동시켜 실험실까지 운반하였으며, 분석 전까지 냉동보관 하였다.

2. 유기염소계화합물 분석

퇴적물과 이매패류 중 유기염소계화합물의 분석은 Hong *et al.* (2003)에 보고한 분석법을 따랐으며 주요 분석과정은 다음과 같다. 상온에서 해동시킨 이매패류는 패각을 제거한 후 육질을 세척된 유리병에 담아 Tekmar tissuemizer를 사용하여 균질화시킨다.

균질화된 생물 시료(15g)는 무수황산나트륨으로 수분을 제거한 후 디클로르메탄으로 16시간 동안 Soxhlet 추출하였다. 퇴적물 시료의 경우 20g을 분석에 이용하였으며 시료 2g은 건중량을 측정하기 위해 사용하였다. 추출된, 수분이 제거된 시료에 내부표준물질(dibromooctafluorobiphenyl, PCB103, PCB169)을 첨가하여 회수율 분석에 이용하였다. 추출액은 2~3 ml으로 농축시킨 후 실리카/알루미나 칼럼을 이용하여 정제과정을 거친다. 퇴

적물 추출액의 경우, 활성화된 구리를 이용하여 황화합물을 제거한 후 실리카/알루미나 칼럼 크로마토그래피를 하였다. 실리카/알루미나 칼럼에는 10 g 알루미나(1% 수분함량)와 20 g 실리카겔(5% 수분함량)을 충전하며, 디클로르메탄으로 추출액을 용출시켰다. 용출액은 회전 농축기로 농축한 후 고순도액체크로마토그래피(HPLC; Phenomenex사의 Phenogel 100 Å이 충전된 250 × 22.5 mm i.d. size-exclusion column)에 통과시켜 분취 및 추가 정제단계를 밟는다. 분취액은 헥산으로 용매치환한 후 고순도 질소가스에 0.5 ml로 농축한 후 내부표준물질(tetrachloro-m-xylene)을 첨가한 후 기기분석하였다.

전자포획검출기(ECD)가 장착된 Hewlett-Packard 5890 가스 크로마토그래피를 유기염소계화합물의 정량·정성분석에 사용하였다. 분석에 이용된 칼럼은 fused silica capillary DB-5 칼럼(30 m × 0.25 mm i.d. × 0.25 m thickness)이며, 헬륨과 아르곤:메탄 혼합가스(95:5)를 각각 carrier gas와 make-up gas로 이용하였다. 가스 크로마토그래피의 온도 프로그램은 다음과 같다: 100°C (1 min) → 140°C (5°C/min, 1 min) → 250°C (1.5°C/min, 1 min) → 300°C (10°C/min, 5 min).

PCB 화합물의 경우, Ultra Scientific사에서 구매한 Aroclor® 1016, 1242, 1254, 1260을 1:1:1:1로 혼합한 혼합액을 표준용액으로 사용하여 총 89개 개별 congeners를 분석하였으며, 그 합을 ΣPCB로 나타내었다. 유기염소계농약은 Ultra Scientific사에서 혼합액으로 구매하여 사용하였으며, DDT 화합물류(DDTs), 클로르단 화합물류(CHLs), 헥사클로르사이클로헥산 화합물류(HCHs), 헥사클로르벤젠(HCB), 알드린(Aldrin), 디엘드린(Dieldrin), 엔드린(Endrin), 엔도설판 II(Endosulfan II), 미렉스(Mirex)의 총 23종을 포함한다. 본 연구에서는 각 화합물 그룹의 총 농도를 다음과 같이 나타내었다. 퇴적물과 이매페류의 각 정점별 농도는 건중량을 기준으로 한다.

ΣDDT : o, p'-DDE + p, p'-DDE + o, p'-DDD + p, p'-DDD + o, p'-DDT + p, p'-DDT.

ΣHCH : α - + β - + γ - + δ -HCH

ΣCHL : α -Chlordane + γ -Chlordane - cis-Nonachlor + trans-Nonachlor + Oxychlordane + Heptachlor + Heptachlor epoxid

3. 정성 및 정량(QA/QC)

PCBs, DDTs, CHLs, HCHs 화합물의 회수율은 각각 71~102, 83~122, 76~126, 82~105%를 나타냈다. 표준물질인 Environment Canada의 EC-4(해양퇴적물)와

NIST의 1941a(홍합균질시료)를 분석하여 전 분석과정을 검증하였다(Hong 2002; Hong *et al.* 2003). 각 대상화합물의 분석결과는 검증된 범위를 나타냈다.

결과 및 토의

1. 표층퇴적물

표층퇴적물에 잔류하는 ΣPCB, ΣDDT, ΣCHL, ΣHCH는 각각 2.25~11.4 ng g⁻¹, 0.16~1.16 ng g⁻¹, 미검출~0.51 ng g⁻¹, 0.05~0.79 ng g⁻¹의 농도를 나타냈다(Table 1). 기타 유기염소계농약 역시 광양만내 퇴적물 시료에서 대부분 검출되었으나 HCB(미검출~0.18 ng g⁻¹), Aldrin(미검출~0.58 ng g⁻¹), Dieldrin(미검출~0.06 ng g⁻¹), Endrin(미검출~0.12 ng g⁻¹), Endosulfan II(미검출~0.4 ng g⁻¹), Mirex(미검출~0.05 ng g⁻¹)는 낮은 농도수준을 보였다. PCB 화합물은 퇴적물층에 잔류하는 주요 유기염소계화합물로 검출되었으며, DDT 화합물은 주요 유기염소계농약으로 확인되었다.

광양만 표층퇴적물 중 PCB 화합물의 농도는 NOAA(1991)와 MacDonald *et al.*(2000)이 제시한 effect-range low(ER-L, 50 ng g⁻¹)와 threshold effect concentrations(TEC, 48 ng g⁻¹)보다 낮았다(Fig. 2). ΣDDT 함량 역시 정점점에서 ER-L 값보다 낮은 수준을 보였으며, p, p'-DDE, p, p'-DDD, p, p'-DDT 농도는 각각 0.06~0.43 ng g⁻¹, 미검출~0.18 ng g⁻¹, 미검출~0.43 ng g⁻¹로서 각각의 ER-L 값(p, p'-DDE, 2.0 ng g⁻¹; p, p'-DDD, 2.0 ng g⁻¹; p, p'-DDT, 1.0 ng g⁻¹)보다 낮은 수준을 나타냈다. CHL 화합물은 23개 정점 중 1개 정점(S12)에서 ER-L 값(0.5 ng g⁻¹)보다 높은 농도를 나타냈으며, Dieldrin과 Endrin 화합물은 각각 30, 43% 정점에서 ER-L 값(Dieldrin, 0.02 ng g⁻¹; Endrin, 0.02 ng g⁻¹) 이상의 농도를 나타내고 있으나 ER-M 값보다 낮은 수준이다.

광양만내 PCB 화합물의 농도는 Bothnia 만(Standberg

Table 1. Summary of organochlorine concentrations in surface sediments and bivalves

Compound	Sediment (n = 23)	Bivalve (n = 12)
ΣPCB	2.25 ~ 11.4 (6.15 ± 3.0) ^a	9.97 ~ 31.7 (19.2 ± 6.59)
ΣDDT	0.16 ~ 1.16 (0.43 ± 0.22)	7.54 ~ 22.6 (12.0 ± 4.62)
ΣCHL	nd ~ 0.51 (0.09 ± 0.12)	0.49 ~ 2.0 (1.03 ± 0.50)
ΣHCH	0.05 ~ 0.79 (0.4 ± 0.21)	0.82 ~ 7.32 (1.86 ± 1.78)
HCB	nd ^b ~ 0.18 (0.03 ± 0.05)	nd ~ 0.34 (0.08 ± 0.12)
Dieldrin	nd ~ 0.06 (0.01 ± 0.02)	nd ~ 0.41 (0.14 ± 0.16)
Endosulfan II	nd ~ 0.4 (0.05 ± 0.09)	nd ~ 4.99 (1.67 ± 1.40)

^amin-max (mean ± sd); ^bnd: not detected

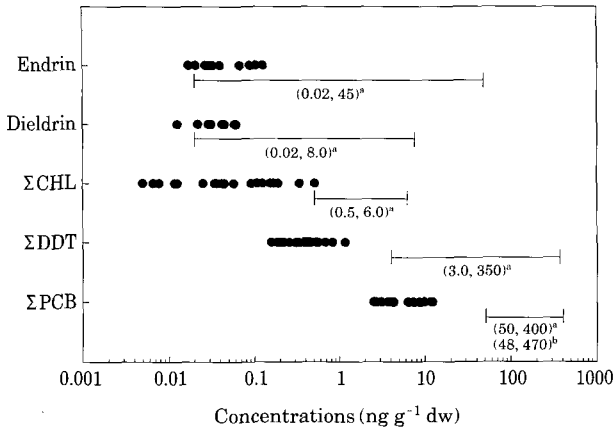


Fig. 2. The comparison of organochlorine concentrations in sediments from the coast of Korea with sediment quality guidelines (SQG). Dieldrin and endrin compounds are not detected at 15 and 12 stations, respectively, which are not included in this figure. ^a(ER-L, ER-M): Effect range low and effect range median values were suggested by NOAA (1991). ^b(TEC, MEC): Threshold effect concentration and midrange effect concentration were suggested by MacDonald *et al.* (2000).

et al. 2000), Daya 만(Zhou *et al.* 2001), San Francisco 만(Venkatesan *et al.* 1999), Lingding 만(Mai *et al.* 2002)에서 보다 낮으며, Admiralty 만(Montone *et al.* 2001), Arcachon 만(Thompson *et al.* 1999)에서와 유사한 수준이다. 광양만의 주변으로는 대규모의 제철소 및 산업단지, 농공단지, 석유화학단지 및 이러한 공업활동을 지원하는 대규모의 컨테이너항이 밀집해 있어, PCBs 오염의 우려 지역으로 예측되어 왔다. 특히 PCB 화합물은 제철소에서 가동되는 대형장비(축전기 및 변압기 등)의 유동액상에 함유되어 있으며, Sintering 과정에서 비의도적으로 생성되어 환경 중으로 배출되는 것으로 알려져 있다(Alcock *et al.* 1999). 오염물질이 해역내 오랜 시간 잔류할 수 있는 반폐쇄적인 지형학적 구조를 가지고 있음에도 불구하고, 광양만내 PCB 화합물의 농도는 산업화된 다른 국내 주요만(부산만, 울산만, 영일만)보다 낮은 수준이다(Table 2, 해양수산부 2001). 특히, 광양만과 같이 대형제철소가 만 내에 위치해 있는 영일만에 비해 약 10배 낮은 수준이다. 광양만의 경우 PCB 화합물의 수입사용이 금지된 해(1984년)로부터 3년 뒤에 대형제철소가 설립되므로써 오염의 역사가 짧고 PCB가 함유된 장비의 사용이 적을 수 있음을 고려할 수 있다. 혹은, 만 안쪽으로의 대형선박의 운항을 위한 수로정비를 위해 만 내에서 정기적으로 이뤄지는 준설활동이 퇴적층에 축적된 PCB 화합물을 제거하는 효과를 나타냈을 수 있다. 그러나, 준설

Table 2. Comparison of PCB concentrations^a in sediments from Gwangyang Bay with those from other industrialized bays in Korea

Location	Sediment	Bivalve
Gwangyang Bay	0.61~1.97 (1.3) ^b	4.42~19.9 (11.6)
Busan Bay ^c	5.71~199 (57.9)	90.4~252 (186)
Youngil Bay ^c	0.04~72.8 (10.7)	17.2~534 (134)
Ulsan Bay ^c	2.06~22.3 (8.51)	11.3~168 (84.1)

^a sum of concentrations of 22 PCB congeners (IUPAC Nos. 8, 18, 28, 29, 44, 52, 66, 87, 101, 105, 110, 118, 128, 138, 153, 170, 180, 187, 195, 200, 206, 209); ^b min-max (mean); ^c Referred from MOMAF (2002)

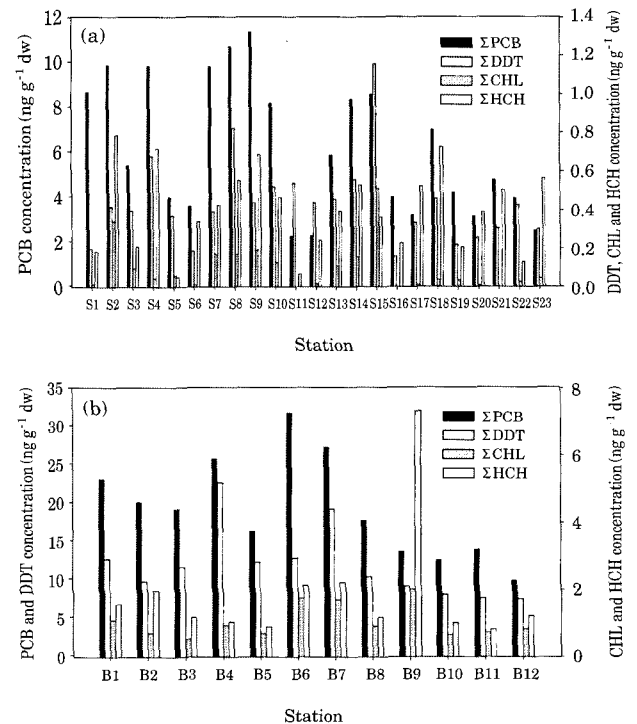


Fig. 3. Spatial distributions of organochlorine compounds in (a) surfaces sediments and (b) bivalves.

로 인한 퇴적물 입자의 재부유와 준설토의 이차오염 등을 고려할 때 광양만내 퇴적물의 PCB 오염과 준설활동간의 연구 역시 필요하다.

광양만 표층퇴적물에서 검출된 주요 유기염소계화합물의 정점별 공간분포를 Fig. 3에 제시하였다. PCB 화합물은 전반적으로 만의 안쪽에서 높게 검출되었으며 여수수로를 따라서 상대적으로 낮은 분포패턴을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 PCB 화합물의 오염이 만의 안쪽에 집중되어 있는 공업시설 및 도시에 연관되어있음을 시사한다. PCB 화합물을 제외한 유기염소계농약류의 경우 만의 안과 밖간의 농도차는 관찰되지 않았다. DDT 화합물

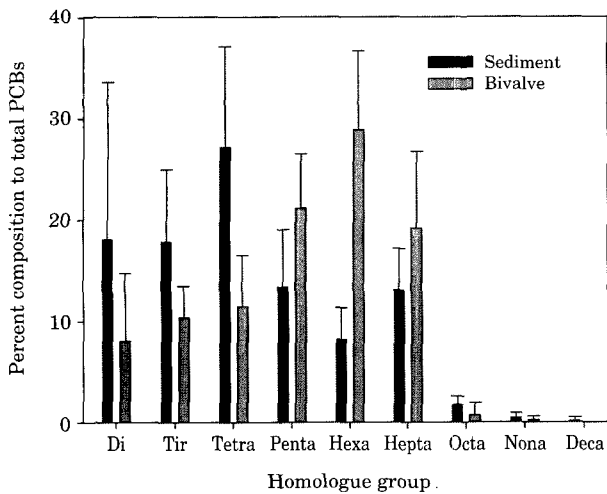


Fig. 4. Average compositions of PCB homologues to total PCBs.

은 섬진강이 유입되는 정점 S15에서 상대적으로 높은 농도를 나타냈으며, CHL 및 HCH 화합물은 전반적으로 균일한 분포를 나타냈다.

PCB 화합물은 비페닐링에 염소기가 결합하는 화합물로서 염소수에 따라 10개의 homologue 그룹을 나눌 수 있다. 표층퇴적물 중의 PCB homologue 패턴을 살펴보면, Tetra- > Di- > Tri- > Penta-, Hepta- > Hexa- > Octa- > Nona- > Deca-chlorinated PCB 순으로 Low-chlorinated PCB가 우세하게 검출되었다(Fig. 4). 대부분의 연안해역의 퇴적물에서 전반적으로 Mid- 혹은 High-chlorinated PCB가 우세하게 분포하고있는 것을 고려할 때 (Hong 2002), 광양만은 Low-chlorinated PCB가 우세한 독자적인 PCB 패턴을 가지고 있음을 확인 할 수 있다. Alcock *et al.* (1999)은 제철공정 중 Sinter strand에서 배출되는 총 PCBs 중 Tri-, Tetra-, Penta-chlorinated PCB가 65~85%를 차지함을 보고하였다. 광양만 퇴적물에서 Tri-, Tetra-, Penta-chlorinated PCB는 총 PCBs의 42~95% (평균±표준편차: 65±17%)을 구성하고 있다. 이와같은 Low-chlorinated PCB가 풍부한 광양만의 특성이 만내 오염원의 종류 및 특성과 관계될 수 있을 것으로 추정된다.

DDE, DDD, DDT의 농도는 각각 0.07~0.43 ng g⁻¹, (0.17±0.08 ng g⁻¹), nd~0.20 ng g⁻¹ (0.09±0.05 ng g⁻¹), nd~0.55 ng g⁻¹ (0.17±0.15 ng g⁻¹)으로 검출되었으며, 총 DDT 농도에 대한 DDE, DDD, DDT의 평균 구성비는 각각 43, 23, 34%으로 모화합물인 DDT보다 분해산물의 구성비가 높게 나타났다. 이는 사용규제 이후 퇴적물 층에 축적된 DDT가 분해과정 중에 있음을 의미한다. HCH 화

합물의 4개 동위체중 α-HCH와 γ-HCH의 농도가 각각 0.13±0.1 ng g⁻¹, 0.17±0.14 ng g⁻¹으로 상대적으로 높았으며, 다음으로 β-HCH > δ-HCH 순을 나타냈다.

퇴적물 중의 유기염소계화합물의 농도는 입도분포(한국해양연구원 2002)와 유의한 상관성을 보이지 않았다. DDT 화합물과 CHLs의 농도분포는 총유기탄소(TOC) 함량과 각각 r²=0.52 (p<0.01, F=15.4), 0.57 (p<0.001, F=18.7)의 양의 상관성을 나타냈으나 PCBs, HCHs, HCB 화합물은 유의한 상관성을 나타내지 않았다.

2. 이매패류

12개 연안정점에서 채집된 이매패류 중의 ΣPCB, ΣDDT, ΣCHL, ΣHCH는 각각 9.97~31.7 ng g⁻¹, 7.54~22.6 ng g⁻¹, 0.49~2.0 ng g⁻¹, 0.82~7.32 ng g⁻¹의 농도를 나타냈다(Table 1). 기타 유기염소계 농약은 HCB(미검출~0.34 ng g⁻¹), Aldrin(미검출~0.46 ng g⁻¹), Dieldrin(미검출~0.41 ng g⁻¹), Endrin(미검출), Endosulfan II(미검출~4.99 ng g⁻¹), Mirex(미검출~0.01 ng g⁻¹)의 농도수준을 보였다. Aldrin, Endrin, Mirex를 제외한 대부분의 유기염소계화합물의 체내 함량은 퇴적물에서 검출된 농도보다 높게 검출되고 있어 생물축적 양상을 나타냈다.

OSPAR Commission (2000)은 Dieldrin, DDE, ΣPCB₇ (IUPAC Nos. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180의 합)에 대해 각각 5~50 ng g⁻¹, 5~50 ng g⁻¹, 5~58 ng g⁻¹의 생태독성평가기준(Ecotoxicological Assessment Criteria, EAC)을 제시하였다. 광양만 이매패류 중의 Dieldrin, DDE, ΣPCB₇는 각각 미검출~0.41 ng g⁻¹, 3.43~18.3 ng g⁻¹, 3.08~15.0 ng g⁻¹으로 EAC 기준값 이하를 나타냈다. 또한 이매패류중 ΣPCB와 ΣDDT 농도는 FDA에서 규정한 Action Limit인 5 ppm과 2 ppm 보다 월등히 낮은 수준이다. 광양만 이매패류 중의 PCBs 농도는 태국, 인디아, 스리랑카에서 보고된 농도와 유사한 수준이며(Tanabe *et al.* 2000; Guruge and Tanabe 2001), Tampa 만, 지중해 연안, Hudson-Raritan 하구에서 보고된 농도에 비해 낮은 수준이다(Richardson *et al.* 1999; Fisher *et al.* 2000).

이매패류 중의 PCB 화합물은 퇴적물에서와 같이 만의 안쪽에서 상대적으로 높은 분포패턴을 보이고 있다(Fig. 3). 그러나, DDT 화합물을 제외한 유기염소계농약류의 경우 대체적으로 만 전체에 걸쳐 균일한 농도분포를 나타내고 있어 비점오염원의 패턴을 나타냈다. DDT 화합물은 정점 B4와 B7에서 각각 22.6 ng g⁻¹, 19.2 ng g⁻¹으로 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이매패류 정점 B7과 퇴적물 정점 S15에서 상대적으로 높은 ΣDDT 농도는 이들

정점이 섬진강하구에 위치해 있고 광양시에 인접한 정점임을 감안할 때 생활하수 및 농경지로부터의 DDT 화합물의 유입을 추정할 수 있다.

이매패류에 축적된 PCB 화합물의 Homologue 그룹간의 구성비는 Hexa-→Penta-→Hepta-chlorinated PCBs의 순을 나타냈으며, 이들 세 그룹은 총 PCB의 $69 \pm 11\%$ 를 차지하고 있다(Fig. 4). 이매패류내 Mid-chlorinated congeners가 우세한 패턴은 퇴적물에서 Low-chlorinated congeners가 우세하게 검출된 것과 차이를 보인다. 특히, PCBs 160/138, 132/153, 202/171/156, 180의 평균농도가 각각 $1.55 \pm 0.66 \text{ ng g}^{-1}$, $2.18 \pm 1.05 \text{ ng g}^{-1}$, $1.16 \pm 0.89 \text{ ng g}^{-1}$, $1.29 \pm 1.61 \text{ ng g}^{-1}$ 으로 89개 PCB congeners 중 높은 값을 나타냈다. 이매패류에서 염소화가 높은 PCB congener의 축적은 선행된 연구에서도 관찰된 바 있다(Thompson *et al.* 1999). 이러한 축적경향은 염소화가 낮은 PCB congener가 생물체내에서 먼저 대사되므로 염소화가 높은 PCB congener의 비가 상승하는 것으로 해석된다.

DDE, DDD, DDT의 총량에 대한 평균 구성비는 각각 62, 22, 16%으로 분해산물인 DDD와 DDE의 함량이 높게 검출되었다. 일반적으로 생물은 퇴적물보다 DDT 대사물질을 많이 함유한다. Ruus *et al.* (1999)은 DDE/DDT 비가 영양단계를 따라 증가함을 확인하였다. 생물은 다양한 경로를 통해 들어오는 외래물질로부터 자신을 보호하기 위해 무독화효소체계를 갖추고 있는데, 대표적 무독화효소인 Cytochrome P450가 연체동물에 존재함이 확인된 바 있다(Livingston 1998).

이매패류 중의 α -, β -, γ -, δ -HCH의 구성비는 각각 22, 50, 21, 7%으로 β -isomer의 농도가 높게 나타났다. HCH 화합물은 HCH의 동위체가 혼합된 Technical HCH와 γ -HCH를 정제화한 Lindane으로 생산되어 사용되어 왔다. Technical HCH내 동위체들의 구성은 다음과 같다(Walker *et al.* 1999); α -HCH (55~80%), β -HCH (5~14%), γ -HCH (8~15%), δ -HCH (2~16%), ϵ -HCH (3~5%). Technical HCH내 α -HCH의 구성비가 높음에도 불구하고 α -HCH는 상대적으로 높은 휘발성을 가지며 분해가 빨라 환경 중의 지속성이 낮다. 반면, β -HCH는 α -HCH와 γ -HCH에 비해 지속성이 높고 생물농축계수가 높다(Willet *et al.* 1998). 따라서 퇴적물 보다 높은 이매패류내 β -HCH의 구성비는 β -HCH의 난분해성 및 생물축적성이 기인하는 것으로 사료된다. 퇴적물과 이매패류 모두에서 β -HCH에 비해 낮은 α -HCH의 함량은 Technical HCH의 최근 유입이 상대적으로 적었음을 의미하기도 한다.

이매패류에 축적된 CHL 화합물 중 α -Chlordane, cis-

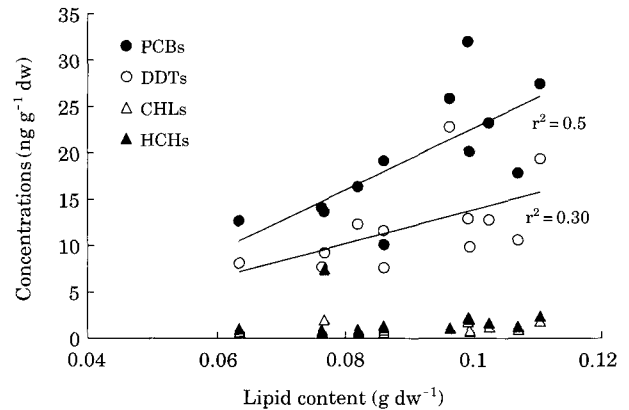


Fig. 5. Relationships between lipid contents and concentrations of organochlorine compounds in bivalves.

Nonachlor, trans-Nonachlor는 각각 31 ± 16 , 22 ± 14 , $26 \pm 11\%$ 의 구성비를 나타냈다. γ -Chlordane, α -Chlordane, Heptachlor, trans-Nonachlor, cis-Nonachlor는 Technical chlordane에서 각각 24 ± 2 , 19 ± 3 , 10 ± 2 , 7 ± 3 , and $7 \pm 1\%$ 를 구성한다(Iwata *et al.* 1993). Technical chlordane 중에 trans-Nonachlor는 γ -Chlordane보다 약 4배 낮게 함유되어 있음에도 불구하고, 퇴적물과 이매패류에서의 높은 trans-Nonachlor의 구성비는 trans-Nonachlor의 난분해적 성향에 기인한다(Iwata *et al.* 1993).

유기염소계화합물은 지질친화성이 강한 화합물로 높은 K_{ow} 값을 가지며, 이로 인해 환경내에 유입된 후 입자 및 생물체에 빠르게 흡착·축적되기 때문에 지질함량이 높은 생물에 상대적으로 다량 축적되는 경향을 나타낸다. 이매패류 중의 지질함량과 유기염소계 농약 간의 상관관계를 살펴보면, PCB와 DDT 화합물의 경우 각각 $r^2 = 0.5$ ($p < 0.01$, $F = 7.0$), 0.3 ($p < 0.1$, $F = 4.3$)의 양의 상관성을 보였으나, CHL 및 HCH 화합물의 경우 유의한 상관성을 보이지 않았다(Fig. 5).

적 요

PCB 화합물 및 유기염소계농약류는 난분해성이며 독성이 높은 대표적인 유기오염물질로서 환경 중에 배출되면 오랜 시간 잔류하게 된다. 대부분의 유기염소계화합물은 우선적 관찰 및 규제 대상물질로 분류되어 지구적 관심을 모으고 있다. 광양만은 대단위의 공업단지가 밀집해있고 반폐쇄적인 지형학적 구조를 가지고 있어 유기염소계화합물의 오염이 우려되는 대표적인 해역이다. 본 연구에서는 오염 모니터링에 대표적으로 이용되는 퇴적물

과 부착성 이매패류를 채집하여 분석함으로써 광양만내 지속성유기염소계화합물의 잔류현황을 파악하고 각 화합물의 분포특성을 살펴보고자 하였다. 퇴적물 및 생물에 잔류하는 유기염소계화합물은 전반적으로 낮은 농도를 나타냈으며, 독성학적 관점에서 볼 때 생태계에 미치는 영향은 낮은 것으로 판단된다. 퇴적물 및 이매패류 모두에서 PCB 화합물은 만의 안쪽에서 상대적으로 높은 분포패턴을 보이고 있다. 이는 만의 안쪽에 PCB 오염원이 존재함을 보여준다. 광양만 퇴적물층에서의 PCB 화합물은 Low-chlorinated PCB (Di-, Tri-, Tetra-PCBs)가 우세한 조성을 나타냈다. 이는 대부분의 연안해역의 퇴적물층에서 전반적으로 Mid- 혹은 High-chlorinated PCB가 우세한 점을 고려할 때 광양만의 독특한 패턴으로서 PCB 화합물의 오염원의 종류 및 유입경로와 관계되는 것으로 사료되며 이에 대한 차후의 연구가 필요하다. DDT 화합물 및 기타 유기염소계농약류의 조성비는 광양만내로의 유기염소계농약의 최근 유입의 가능성이 상대적으로 적어졌음을 나타냈다.

사 사

본 연구는 “남해 특별관리해역의 환경오염 관리모델 연구(1) 광양만 중심 연구”의 일부분으로, 해양연구원의 연구비지원(PE836-00)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 한국해양연구원. 2002. 남해특별관리해역의 환경오염 관리모델 연구. (1) 광양만 중심 연구. BSPE 819-00-1407-7.
- 해양수산부. 2001. 전국연안의 지속성 유기물질 오염실태 조사 연구. BSPM 00070-1336-3.
- Alcock RE, R Gemmill and KC Jones. 1999. Improvements to the UK PCDD/F and PCB atmospheric emission inventory following an emissions measurement programme. *Chemosphere* 38(4):759-770.
- Allen-Gil SM, CP Gubala, R Wilson, DH Landers, TL Wade, JL Sericano *et al.* 1997. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and biota from four US Arctic Lakes. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 33:378-387.
- Ashley JTF and JE Baker. 1999. Hydrophobic organic contaminations in surficial sediments of Baltimore Harbor: Inventories and sources. *Environ. Toxicol. Chem.* 18(5): 838-849.
- Borgá K, GW Gabrielsen and JU Skaare. 2001. Biomagnification of organochlorines along a Barents Sea food chain. *Environ. Pollut.* 113:187-198.
- Fisher WS, LM Oliver, JT Winstead and ER Long. 2000. A survey of oysters *Crassostrea virginica* from Tampa Bay, Florida: associations of internal defence measurements with contaminant burdens. *Aquat. Toxicol.* 51: 115-138.
- Guruge KS and S Tanabe. 2001. Contamination by persistent organochlorines and butyltin compounds in the west coast of Sri Lanka. *Mar. Pollut. Bull.* 42:179-186.
- Hargrave BT, GA Phillips, WP Vass, P Bruecker, HE Welch and TD Siferd. 2000. Seasonality in bioaccumulation of organochlorines in lower tropic level Arctic marine biota. *Environ. Sci. Technol.* 34:980-987.
- Iwata H, S Tanabe, N Sakal and R Tatsukawa. 1993. Distribution of persistent organochlorines in the Oceanic air and surface seawater and the role of ocean on their global transport and fate. *Environ. Sci. Technol.* 27: 1080-1098.
- Livingstone DR. 1998. The fate of organic xenobiotics in aquatic ecosystems: quantitative and qualitative differences in biotransformation by invertebrates and fish. *Comp. Biochem. Physiol. A.* 120:43-49.
- MacDonald DD, LM Dipinto, J Field, CG Ingersoll, ER Long and RC Swartz. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls. *Environ. Toxicol. Chem.* 19:1403-1413.
- Mai BX, JM Fu, GY Sheng, YH Kang, Z Lin, G Zhang, YS Min and EY Zeng. 2002. Chnoriangted and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China. *Environ. Pollut.* 117:457-474.
- Hong SH. 2002. Environmental occurrence and bioaccumulation of organochlorines in Korean Coastal Waters. PhD thesis, Ewha Womans University, Korea.
- Hong SH, UH Yim, WJ Shim, JR Oh and IS Lee. 2003. Horizontal and vertical distribution of PCBs and chlorinated pesticides from Masan Bay, Korea. *Mar. Pollut. Bull.* 46:244-253.
- Montone RC, S Taniguchi and RR Weber. 2001. Polychlorinated biphenyls in marine sediments of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Mar. Pollut. Bull.* 42(7):611-614.
- Muir DCG, NP Grift, WL Lockhart, P Wilkinson, BN Billeck and GJ Brunskill. 1995. Spatial trends and historical profiles of organochlorine pesticides in Arctic lake sediments. *Sci. Total Environ.* 160/161:447-457.
- NOAA. 1991. The potential for biological effects of sedi-

- ment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52, NOAA, Seattle, USA.
- OSPAR Commission. 2000. Quality status report 2000. pp. 41-63. OSPAR Commission, London.
- Richardson BJ and GJ Zheng. 1999. Chlorinated hydrocarbon contaminants in Hong Kong surficial sediment. *Chemosphere* 39(6):913-923.
- Ruus A, KI Ugland, O Espeland and JU Skaare. 1999. Organochlorine contaminants in a local marine food chain from Jarfjord, Northern Norway. *Mar. Environ. Res.* 48:131-146.
- Strandberg B, C Bandh, B van Bavel, PA Bergqvist, D Broman, R Ishaq, C. Näf and C. Rappe. 2000. Organochlorine compounds in the Gulf of Bothnia: sediment and benthic species. *Chemosphere* 40:1205-1211.
- Tanabe S, MS Prudente, S Kan-atiyeklap and A Subramanian. 2000. Mussel watch: marine pollution monitoring of butyltins and organotins in coastal waters of Thailand, Philippines and India. *Ocean Coastal Manage.* 43:819-839.
- Thompson S, H Budzinski, P Garrigues and JF Narbonne. 1999. Comparison of PCB and DDT distribution between water-column and sediment-dwelling bivalves in Arcachon Bay, France. *Mar. Pollut. Bull.* 38(8):655-662.
- UN-ECE. 1998. Draft Protocol to the Convention on Long-range Air Pollution on Persistent Organic Pollutants. (EB.AIR/1998/2). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, United Nations Economic and Social Council, Economic Commission for Europe.
- UNEP. 1999. Guidelines for the identification of PCBs and materials containing PCBs. UNEP reports in Inter-Organization Programme for the sound Management of Chemicals (IOMC). Geneva, Switzerland.
- Venkatesan MI, RP de Leon, A van Geen and SN Luoma. 1999. Chlorinated hydrocarbon pesticides and polychlorinated biphenyls in sediment cores from San Francisco Bay. *Mar. Chem.* 64:85-97.
- Walker K, DA Vallero and RG Lewis. 1999. Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment. *Environ. Sci. Technol.* 33(24):4373-4378.
- Willett KL, EM Ulrich and RA Hites. 1998. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocyclohexane isomers. *Environ. Sci. Technol.* 32(15):2197-2207.
- Zhou JL, K Maskaoui, YW Qiu, HS Hong and ZD Wang. 2001. Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of Daya Bay, China. *Environ. Pollut.* 113:373-384.

Manuscript Received: October 17, 2003

Revision Accepted: January 28, 2004

Responsible Editorial Member: Wonchoel Lee
(Hanyang Univ.)